

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

Dpto. de INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA



**MINI-MOTO CONTROLADA POR
COMPUTADOR:
ARQUITECTURA HARDWARE**

PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL: ELECTRÓNICA

Autor: Rubén Espinosa Polo

Tutor: Luis Moreno Lorente

Septiembre 2010



Agradecimientos



En primer lugar agradecer este proyecto a mi compañero Pablo Núñez, porque este proyecto es tan mío como suyo, por todas las horas que hemos compartido en estos últimos meses, porque es el único que sabe por todo lo que hemos pasado y el esfuerzo que hemos invertido y porque sin él, este proyecto no habría sido lo mismo.

También agradecer a mis hermanos, y en especial a mis padres, por todos los valores que me han inculcado, por la educación recibida y por todo lo que aún me siguen aportando. Gracias por haberme apoyado y creído en mí durante la carrera, espero que se sientan orgullosos.

A mi grupo de amigos por estar ahí cuando se les necesita, por todos los momentos vividos y por las horas de estudio que hemos compartido en la biblioteca durante las épocas de exámenes, haciendo que todo fuera más llevadero. Gracias por estar siempre a mi lado y espero que sigan ahí por mucho tiempo.

A mis compañeros de clase por todos los momentos compartidos durante la carrera, las horas de estudio y prácticas juntos, porque me han ayudado cuando lo necesitaba. No solo me llevo compañeros, sino amigos.

Por último hacer una mención a los compañeros del laboratorio de robótica, ya que siempre que han podido nos han aconsejado y ayudado.

Gracias a todos.

Rubén Espinosa Polo
28 de Septiembre de 2010



Índice general



1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS	1
1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. FASES DEL DESARROLLO	3
1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	5
2. ESTADO DEL ARTE	6
2.1. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA	7
2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS	12
2.2.1. <i>Arquitectura</i>	12
2.2.2. <i>Generación</i>	15
2.2.3. <i>Nivel de inteligencia</i>	16
2.2.4. <i>Nivel de control</i>	17
2.2.5. <i>Lenguaje de programación</i>	17
2.3. ROBOTS MÓVILES	18
2.3.1. <i>Configuraciones cinemáticas de los RMR</i>	21
2.3.2. <i>Actuadores en los RMR</i>	24
2.3.3. <i>Control de los RMR</i>	25
2.4. HISTORIA DE LAS MOTOR RC	25
3. SISTEMA MECÁNICO	31
3.1. ESTRUCTURA DE LA MOTO	32
3.1.1. <i>Bastidor</i>	32
3.1.2. <i>Horquilla delantera</i>	33
3.1.3. <i>Basculante trasero</i>	34
3.1.4. <i>Suspensión trasera</i>	34
3.1.5. <i>Soporte de dirección</i>	35
3.1.6. <i>Transmisión</i>	36
3.1.7. <i>Neumáticos</i>	37
3.1.8. <i>Carcasa</i>	37
3.1.9. <i>Barras antivuelco</i>	38
3.1.10. <i>Esquema general</i>	38



4. SISTEMA ELECTRÓNICO	40
4.1. MOTOR BRUSHLESS	41
4.1.1. Introducción	41
4.1.2. Principio de funcionamiento	42
4.1.3. Características técnicas	45
4.2. SERVOMOTOR	45
4.2.1. Introducción	45
4.2.2. Definición y estructura	46
4.2.3. Principios de funcionamiento	47
4.2.4. Tamaño y potencia	49
4.2.5. Características técnicas	50
4.3. VARIADOR O REGULADOR ELECTRÓNICO DE VELOCIDAD	50
4.3.1. Introducción	50
4.3.2. Principios de funcionamiento	51
4.3.3. Definición y estructura	52
4.3.3.1. El módulo de control	52
4.3.3.2. El módulo de potencia	52
4.3.3.3. Componentes de potencia	53
4.3.4. Principales modos de funcionamiento	53
4.3.5. Características técnicas	53
4.4. PUENTE H	54
4.4.1. L298N	55
4.4.2. Componentes del puente H	57
4.5. GIRÓSCOPO	58
4.5.1. Definición	58
4.5.2. Historia	58
4.5.3. El efecto giroscópico	59
4.5.3.1. Descripción del efecto	59
4.5.3.2. Explicación del efecto	60
4.5.4. Movimientos del giróscopo	61
4.5.4.1. Precesión	62
4.5.4.2. Nutación	62
4.5.5. Efecto en una bicicleta	63
4.5.6. Estructura y funcionamiento del giróscopo eléctrico	65



4.6.	BATERÍAS	66
4.7.	CONEXIONADO SISTEMA ELECTRÓNICO	68
4.8.	ESQUEMA GENERAL	69
5.	CONTROL MEDIANTE PWM	71
5.1.	INTRODUCCIÓN	72
5.1.1.	<i>Definición</i>	72
5.1.2.	<i>Aplicaciones</i>	72
5.1.3.	<i>Duty cycle</i>	73
5.2.	SERVOMOTOR	74
5.3.	MOTOR DC	75
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	78
6.1.	CONCLUSIONES	79
6.2.	TRABAJOS FUTUROS	80
7.	COSTES DEL PROYECTO	81
	BIBLIOGRAFÍA	84
	ANEXOS	87
	ANEXO I - L298N	88
	ANEXO II - W02G	100



Índice de figuras

CAPITULO 4: SISTEMA ELECTRÓNICO

Figura 4.1.- <i>Motor brushless</i>	42
Figura 4.2.- <i>Esquema de funcionamiento de un motor de corriente continua sin escobillas</i>	43
Figura 4.3.- <i>Aspecto de un motor de corriente continua Sin escobillas trifásico</i>	44
Figura 4.4.- <i>Inversor trifásico en puente con IGBTs</i>	44
Figura 4.5.- <i>Motor brushless KB36-50-XXS-Fin de 5900 KV</i>	45
Figura 4.6.- <i>Servomotor</i>	46
Figura 4.7.- <i>Estructura típica</i>	47
Figura 4.8.- <i>Pulsos PWM para controlar servos</i>	48
Figura 4.9.- <i>Color de los cables según el fabricante</i>	48
Figura 4.10.- <i>Servo Toyabi 3 Kg</i>	50
Figura 4.11.- <i>Variador Novatech High Speed 75 A</i>	52
Figura 4.12.- <i>Puente H</i>	54
Figura 4.13.- <i>L298N</i>	56
Figura 4.14.- <i>Patillaje del L298N</i>	57
Figura 4.15.- <i>Esquema puente H utilizado en el proyecto</i>	58
Figura 4.16.- <i>Sentido de las fuerzas</i>	59
Figura 4.17.- <i>Vectores de velocidad</i>	61
Figura 4.18.- <i>Velocidades de masa</i>	61
Figura 4.19.- <i>Movimiento de precesión, nutación y rotación</i>	63
Figura 4.20.- <i>Momentos en una bicicleta</i>	64
Figura 4.21.- <i>Motor y regulador del giróscopo</i>	65
Figura 4.22.- <i>Giróscopo eléctrico</i>	66
Figura 4.23.- <i>Horquilla trasera con giróscopo</i>	66
Figura 4.24.- <i>Batería NiMh 7.2 V</i>	67
Figura 4.25.- <i>Pila de 9 V con conector</i>	67
Figura 4.26.- <i>Lateral izquierdo de la moto</i>	69
Figura 4.27.- <i>Lateral derecho de la moto</i>	69
Figura 4.28.- <i>Planta de la moto</i>	70



CAPITULO 5: CONTROL MEDIANTE PWM

Figura 5.1.- <i>Modulación por ancho de pulsos</i>	72
Figura 5.2.- <i>Esquema PWM</i>	73
Figura 5.3.- <i>Posición del servo en función de la PWM</i>	75
Figura 5.4.- <i>Velocidad máxima, media y mínima</i>	77



Índice de tablas

**CAPITULO 4: SISTEMA ELECTRÓNICO**

Tabla 4.1.- <i>Características técnicas motor brushless</i>	45
Tabla 4.2.- <i>Características técnicas de algunas marcas de servo</i>	49
Tabla 4.3.- <i>Características técnicas servomotor</i>	50
Tabla 4.4.- <i>Características técnicas variador Novatech</i>	54
Tabla 4.5.- <i>Casos puente H</i>	55
Tabla 4.6.- <i>Casos L298N</i>	56

CAPÍTULO 7: COSTES DEL PROYECTO

Tabla 7.1.- <i>Tiempo invertido en cada fase del proyecto</i>	82
Tabla 7.2.- <i>Costes económicos del proyecto</i>	83



Capítulo 1. **Introducción y objetivos**

1.1. Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, el ser humano ha tratado de desarrollar todo tipo de máquinas que de algún modo u otro buscaban automatizar procesos de la vida cotidiana del hombre, de manera que estos artefactos hiciesen más fácil la vida de este. Con el paso de los años estas máquinas han ido ganando en complejidad y recibiendo todo tipo de nombres, hasta que en el año 1921, de la mano del escritor checo Karel Capek, fue usado, por primera vez, el término robot en una novela de ficción.

Hay muchos trabajos que las personas no les gusta hacer, sea ya por ser aburrido o bien peligroso, siempre se va a tratar de evitar para no hacerlo. La solución más práctica en la historia era obligar a alguien para que hiciera el trabajo, esto se le llama esclavitud y se usaba prácticamente en todo el mundo.

Ahora los robots son ideales para trabajos que requieren movimientos repetitivos y precisos. Una ventaja para las empresas es que los humanos necesitan descansos, salarios, comida, dormir, y una área segura para trabajar, los robots no. La fatiga y aburrimiento de los humanos afectan directamente a la producción de una compañía, los robots nunca se cansan.

Uno de los campos de estudio dentro de la Robótica es la navegación autónoma de los robots. Desde hace muchos años, numerosos investigadores trabajan día a día para conseguir que los robots sean cada vez mas autónomos y puedan desplazarse por entornos cada vez más complejos con una mayor facilidad e independencia.

1.2. Objetivos

El objetivo que persigue el Proyecto Final de Carrera descrito en este documento es el desarrollo de una moto de automodelismo controlada mediante la obtención de datos de un ordenador y su control de movimiento mediante un microcontrolador. Esta moto deberá de mantenerse estable durante el trayecto a velocidades medias-bajas.

Para ello contamos con un microcontrolador PIC32, con el cual se obtendrán los datos introducidos en el PC y a partir del procesamiento de estos datos, obtendremos los resultados en el movimiento de la moto.

Con los valores introducidos por el usuario, y usando la técnica PWM para el control de los motores, el usuario podrá describir con la moto el trayecto que considere necesario controlando la velocidad y el giro.

Todo el control viene estudiado por numerosas simulaciones y trabajos de campo para que conociendo los puntos máximos y mínimos a los que puede llegar el servo y el motor brushless, se pueda mantener el equilibrio de la moto a velocidades medias-bajas.

Este equilibrio viene determinado por un giroscopio situado en la rueda trasera que proporcionará a la moto una estabilidad adicional basándose en el efecto giroscópico.

1.3. Fases del desarrollo

Conociendo el objetivo a realizar, la primera fase a desarrollar fue hacer un trabajo de estudio e investigación para llevar a cabo el proyecto. Este estudio se basó en la búsqueda de proyectos ya existentes, comparando las diferentes motos del mercado y sus características para conseguir las mejores soluciones.

Se decidió comprar una moto de radio control por piezas modelo ARX-540. Una vez conseguidas las piezas de la moto, la siguiente fase consistió en la construcción mecánica de la misma siguiendo su manual [1]. Se comenzó por la rueda delantera, continuando por la rueda trasera junto el giroscopio y todo su carenado. A continuación se montó el cuerpo de la moto, donde se colocaron los dos motores necesarios, motor brushless y servomotor. Todo el montaje se realizó detenidamente para que cada pieza quedara bien ajustada y en un futuro no diera ningún problema de estabilidad, ya que el más mínimo error de construcción podría hacer que la moto se desestabilice. Finalmente se realizó la conexión de todas las partes y su final puesta a punto.

Una vez construida, se decidió realizar una serie de pruebas con la moto totalmente radiocontrolada para conocer y estudiar su funcionamiento antes de controlarla mediante un microcontrolador. Las pruebas nos hicieron ver a que velocidades podíamos trabajar con ella y controlar el motor brushless y los valores de servo para los que la moto funciona correctamente. Después, mediante su visión en un

osciloscopio, poder saber los valores de PWM que necesitaríamos utilizar para su futuro control.

El siguiente paso a seguir fue la programación de nuestro microcontrolador basándonos en sus salidas de PWM y el estudio de la programación del PIC32 [3]. Este microcontrolador contiene 5 salidas PWM de las cuales se utilizan 2 en el proyecto, OC1 para controlar el servomotor y OC3 para controlar el motor brushless. La programación se realiza en C, mediante el programa MPLAB, que nos permite escribir y compilar el código para poder volcarlo en nuestro microcontrolador. Esto se realiza mediante la conexión USB entre el microcontrolador y el PC. Una vez depurado y descargado el código basándonos en los datos conseguidos en la prueba de radio control, observamos en un osciloscopio si las funciones de PWM se correspondían con los valores que necesitábamos para el control de la moto de automodelismo. Se extrajo la parte de radio control y realizamos diferentes pruebas hasta conseguir que todos los valores coincidieran.

Para realizar el conexionado de los motores con el PIC se tuvo que resolver un problema. El microcontrolador se alimenta con una batería de 9 V y mediante éste conseguimos alimentar el servomotor con una de sus salidas de 5 V. El problema estaba en el motor brushless, ya que se alimenta a través del variador mediante una batería de 3300 mAh. Al ser un motor brushless de gran potencia, cuando acelera o frena introduce grandes picos de corriente que al entrar en la tarjeta del PIC producen un fallo en la misma.

Se solucionó este problema mediante el montaje de un circuito intermedio entre el variador y el microcontrolador. Este circuito consiste en un puente H. Este pequeño circuito electrónico permite alimentar el motor brushless con una tensión distinta a los 5 V que emite el PIC, y controlar el motor en ambos sentidos, avance y retroceso. Además consta de 4 diodos que nos permiten controlar los picos de corriente para que así, no lleguen a estropear el microcontrolador que no los aguantaría.

Resuelto el problema, se realizó el cableado entre los motores y el PIC, integrando toda la parte electrónica en la moto y terminando así el diseño y montaje electrónico.

Finalmente, se volvieron a realizar pruebas a pie de campo, probando varios programas realizados previamente para comprobar que la moto funciona de forma correcta y es capaz de realizar de manera autónoma las trayectorias deseadas.

Para la correcta puesta en marcha, es necesario activar primeramente el interruptor del variador encargado de accionar el giróscopo debido a que necesita 40 segundos para trabajar a su máximo rendimiento. Pasado ese tiempo se alimentará el microcontrolador para que comience a ejecutar el programa previamente descargado.

1.4. Estructura de la memoria

El presente proyecto se encuentra dividido en 6 capítulos, los cuales se van a describir a continuación.

- Capítulo 1: Se describen los objetivos y todas las fases del proyecto.
- Capítulo 2: Se habla de la historia relacionada con el mundo de la robótica, los diferentes grupos en los cuales se pueden clasificar los robots, los robots móviles y las motos de RC.
- Capítulo 3: Se describe la parte mecánica de la moto. Se explica cada una de sus partes y donde se encuentran situados cada uno de sus componentes para ubicarlos sobre la moto.
- Capítulo 4: Se explica toda la parte electrónica empleada para el funcionamiento de la moto, tanto los motores como las baterías y el puente H.
- Capítulo 5: Se describe el funcionamiento de una PWM y cómo actúa sobre el motor brushless y el servomotor.
- Capítulo 6: Se comentan las conclusiones obtenidas y los posibles trabajos futuros a desarrollar.
- Capítulo 7: Se desglosa de forma aproximada los costes del proyecto que han sido necesarios.



Capítulo 2.

Estado del arte

2.1. Introducción a la robótica

Según la Real Academia Española se define robot como: máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas sólo a las personas [7].

El término procede de la palabra checa robota, que significa 'trabajo obligatorio'; fue empleado por primera vez en la obra teatral R.U.R. (Robots Universales de Rossum), estrenada en Enero de 1921 en Praga por el novelista y dramaturgo checo Karel Capek. La obra fue un éxito inmediato y pronto se estrenó en multitud de teatros por toda Europa y Estados Unidos. En ella, el gerente de una fábrica construía unos seres al absoluto servicio del hombre, que realizaban todas las tareas mientras los humanos se dedicaban al ocio permanente. Cuando el gerente de la fábrica decide construir robots más perfectos que experimentaran felicidad y dolor, todo cambia. Los robots se sublevan contra los hombres y destruyen al género humano.

El concepto de máquinas automatizadas se remonta a la antigüedad, con mitos de seres mecánicos vivientes. Los autómatas, o máquinas semejantes a personas, ya aparecían en los relojes de las iglesias medievales, y los relojeros del siglo XVIII eran famosos por sus ingeniosas criaturas mecánicas.

El control por realimentación, el desarrollo de herramientas especializadas y la división del trabajo en tareas más pequeñas que pudieran realizar obreros o máquinas fueron ingredientes esenciales en la automatización de las fábricas en el siglo XVIII. A medida que mejoraba la tecnología se desarrollaron máquinas especializadas para tareas como poner tapones a las botellas o verter caucho líquido en moldes para neumáticos. Sin embargo, ninguna de estas máquinas tenía la versatilidad del brazo humano, y no podía alcanzar objetos alejados y colocarlos en la posición deseada.

En la década de 1890 el científico Nikola Tesla, inventor, entre muchos otros dispositivos, de los motores de inducción, ya construía vehículos controlados a distancia por radio. Tesla fue un visionario que escribió sobre mecanismos inteligentes tan capaces como los humanos.



Figura 2.1.- Nikola Tesla

Las máquinas más próximas a lo que hoy en día se entiende como robots fueron los "teleoperadores", utilizados en la industria nuclear para la manipulación de sustancias radiactivas. Básicamente se trataba de servomecanismos que, mediante sistemas mecánicos, repetían las operaciones que simultáneamente estaba realizando un operador.

Inmediatamente después de la Segunda Guerra Mundial comienzan los primeros trabajos que llevan a los robots industriales. A finales de los 40 se inician programas de investigación en los laboratorios de Oak Ridge y Argonne National Laboratories para desarrollar manipuladores mecánicos para elementos radiactivos. Estos manipuladores eran del tipo "maestro-esclavo", diseñados para que reprodujeran fielmente los movimientos de brazos y manos realizados por un operario.

El inventor estadounidense George C. Devol desarrolló en 1954 un dispositivo de transferencia programada articulada (según su propia definición); un brazo primitivo que se podía programar para realizar tareas específicas.

En 1958, Devol se unió a Joseph F. Engelberger y, en el garaje de este último, construyeron un robot al que llamaron Unimate. Era un dispositivo que utilizaba un computador junto con un manipulador que conformaba una "máquina" que podía ser "enseñada" para la realización de tareas variadas de forma automática. En 1962, el primer Unimate fue instalado a modo de prueba en una planta de la General Motors para funciones de manipulación de piezas y ensamblaje, con lo que pasó a convertirse en el primer robot industrial. Devol y Engelberger fundarían más tarde la primera compañía dedicada expresamente a fabricar robots, Unimation, Inc., abreviación de Universal Automation.

Se puede considerar este punto como el inicio de la era de la Robótica tal como la conocemos, mediante la utilización de los robots programados, una nueva y potente herramienta de fabricación.

Durante la década de los 60, un nuevo concepto surge en relación con los anteriores avances. En vistas a una mayor flexibilidad, se hace necesaria la realimentación sensorial. En 1962, H. A. Ernst publica el desarrollo de una mano mecánica controlada por computador con sensores táctiles llamada MH-1. Este modelo evolucionó adaptándole una cámara de televisión dentro del proyecto MAC. También en 1962, Tomovic y Boni desarrollan una mano con un sensor de presión para la detección del objeto que proporcionaba una señal de realimentación al motor.

En 1963 se introduce el robot comercial VERSATRAN por la American Machine and Foundry Company (AMF). En el mismo año se desarrollan otros brazos manipuladores como el Roehampton y el Edinburgh.

En 1967 y 1968 Unimation recibe sus primeros pedidos para instalar varios robots de la serie Unimate 2000 en las cadenas de montaje de la General Motors. Al año siguiente los robots ensamblaban todos los coches Chevrolet Vega de esta compañía.

En 1968 se publica el desarrollo de un computador con "manos", "ojos" y "oídos" (manipuladores, cámaras de TV y micrófonos) por parte de McCarthy en el Stanford Artificial Intelligence Laboratory. En el mismo año, Pieper estudia el problema cinemático de un manipulador controlado por un computador. También este año, la compañía japonesa Kawasaki Heavy Industries negocia con Unimation la licencia de sus robots. Este momento marca el inicio de la investigación y difusión de los robots industriales en Japón.

En 1969 se demuestran las propiedades de la visión artificial para vehículos autoguiados en el Stanford Research Institute. Este mismo año se desarrollaron los brazos Boston y Stanford, este último dotado de una cámara y controlado por computador. Sobre el brazo Stanford se desarrolló un experimento en el que el manipulador apilaba bloques según determinados criterios.

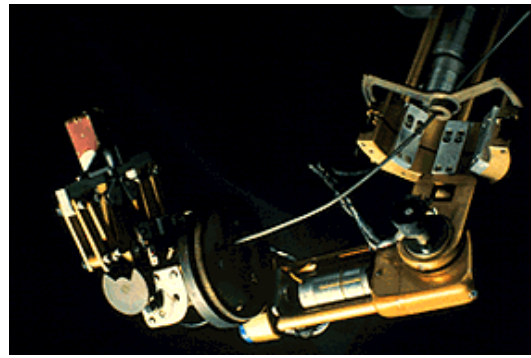


Figura 2.2.- Brazo Stanford

Las primeras aplicaciones industriales en Europa, aplicaciones de robots industriales en cadenas de fabricación de automóviles, datan de los años 1970 y 1971. En este último año, Kahn y Roth analizan el comportamiento dinámico y el control de un brazo manipulador.

Durante la década de los 70, la investigación en robótica se centra en gran parte en el uso de sensores externos para su utilización en tareas de manipulación. Es también en estos años cuando se consolida definitivamente la presencia de robots en las cadenas de montaje y plantas industriales en el ámbito mundial.

En 1972 se desarrolló en la universidad de Nottingham, Inglaterra, el SIRCH, un robot capaz de reconocer y orientar objetos en dos dimensiones. Este mismo año, la empresa japonesa Kawasaki instala su primera cadena de montaje automatizada en Nissan, Japón, usando robots suministrados por Unimation, Inc.

En 1973, Bolles y Paul utilizan realimentación visual en el brazo Stanford para el montaje de bombas de agua de automóvil. También este mismo año, la compañía sueca ASEA (futura ABB), lanza al mercado su familia de robots IRB 6 e IRB 60, para funciones de perforación de piezas.

En 1974, Nevins y sus colaboradores, en el Draper Laboratory, investigan técnicas de control basadas en la coordinación de fuerzas y posiciones, y Bejczy, en el Jet Propulsion Laboratory, desarrolla una técnica para el control de par basada en el robot Stanford. El mismo año, Inoue, en el Artificial Intelligence Laboratory del MIT, desarrolla trabajos de investigación en los que aplica la inteligencia artificial en la realimentación de fuerzas.

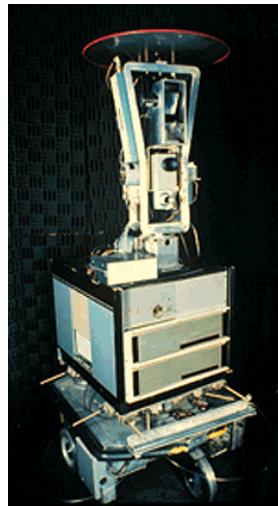


Figura 2.3.- Shakey, el primer vehículo auto guiado controlado por inteligencia artificial

También este mismo año, la empresa Cincinnati Milacron introduce el T3 (The Tomorrow Tool), su primer robot industrial controlado por computador. Este manipulador podía levantar más de 100 libras y seguir objetos móviles en una línea de montaje.

En 1975, Will y Grossman, en IBM, desarrollaron un manipulador controlado por computador con sensores de contacto y fuerza para montajes mecánicos. Este mismo año, el ingeniero mecánico estadounidense Victor Scheinman, cuando estudiaba la carrera en la Universidad de Stanford, California, desarrolló un manipulador polivalente realmente flexible conocido como Brazo Manipulador Universal Programable (PUMA, siglas en inglés). El PUMA era capaz de mover un objeto y colocarlo en cualquier orientación en un lugar deseado que estuviera a su alcance. El concepto básico multiarticulado del PUMA es la base de la mayoría de los robots actuales.

En 1976, estudios sobre el control dinámico llevados a cabo en los laboratorios Draper, Cambridge, permiten a los robots alinear piezas con movimientos laterales y rotacionales a la vez.

En 1979 Japón introduce el robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), y la compañía italiana DEA (Digital Electric Automation), desarrolla el robot PRAGMA para la General Motors.

En la década de los 80 se avanza en las técnicas de reconocimiento de voz, detección de objetos móviles y factores de seguridad. También se desarrollan los primeros robots en el campo de la rehabilitación, la seguridad, con fines militares y

para la realización de tareas peligrosas. Así por ejemplo, en 1982, el robot Pedesco, se usa para limpiar un derrame de combustible en una central nuclear. También se pone un gran énfasis en los campos de visión artificial, sensorización táctil y lenguajes de programación. Gracias a los primeros pasos dados por compañías como IBM o Intelledex Corporation, que introdujo en 1984 el modelo ligero de ensamblaje 695, basado en el microprocesador Intel 8087 y con software Robot Basic, una modificación del Microsoft Basic, actualmente se tiende al uso de una interfaz (el ordenador) y diversos lenguajes de programación especialmente diseñados, que evitan el "cuello de botella" que se producía con la programación "clásica". Esta puede ser ahora on-line u off-line, con interfaces gráficas (user-friendly interfaces) que facilitan la programación, y un soporte SW+HW que tiende a ser cada vez más versátil.



Figura 2.4.- Robot PUMA

2.2. Clasificación de los robots

Actualmente es posible encontrar una variada gama de formas de clasificar a los robots [8]. A continuación ofrecemos un completo detalle.

2.2.1. Arquitectura

- **Androides:** Los androides son robots que se parecen y actúan como seres humanos. Los robots de hoy en día vienen en todas las formas y tamaños, pero a excepción de los que aparecen en las ferias y espectáculos, no se parecen a las personas y por tanto no son androides. Actualmente, los androides reales sólo existen en la imaginación y en las películas de ficción.



Figura 2.5.- Robot Androide

- **Móviles:** Los robots móviles están provistos de patas, ruedas u orugas que los capacitan para desplazarse de acuerdo su programación. Elaboran la información que reciben a través de sus propios sistemas de sensores y se emplean en determinado tipo de instalaciones industriales, sobre todo para el transporte de mercancías en cadenas de producción y almacenes. También se utilizan robots de este tipo para la investigación en lugares de difícil acceso o muy distantes, como es el caso de la exploración espacial y las investigaciones o rescates submarinos.



Figura 2.6.- Robot móvil

- **Zoomórficos:** Robots caracterizados principalmente por sus sistema de locomoción que imita a diversos seres vivos. Los androides también podrían considerarse robots zoomórficos.



Figura 2.7.- Robot zoomórfico

- **Médicos:** Los robots médicos son, fundamentalmente, prótesis para disminuidos físicos que se adaptan al cuerpo y están dotados de potentes sistemas de mando. Con ellos se logra igualar con precisión los movimientos y funciones de los órganos o extremidades que suplen.



Figura 2.8.- Robot médico

Cabe decir que pese a que la clasificación anterior es la más conocida, existe otra no menos importante donde se tiene en cuenta la potencia del software en el controlador, lo que es determinante de la utilidad y flexibilidad del robot dentro de las limitantes del diseño mecánico y la capacidad de los sensores. Los robots han sido clasificados de acuerdo a su generación, a su nivel de inteligencia, a su nivel de control, y a su nivel de lenguaje de programación.

2.2.2. Generación

La generación de un robot se determina por el orden histórico de desarrollos en la robótica. Cinco generaciones son normalmente asignadas a los robots industriales. La tercera generación es utilizada en la industria, la cuarta se desarrolla en los laboratorios de investigación, y la quinta generación es un gran sueño.

- **Robots de 1º Generación**

El sistema de control usado en la primera generación de robots está basado en la “paradas fijas” mecánicamente. Como ejemplo de esta primera etapa están los mecanismos de relojería que mueven las cajas musicales o los juguetes de cuerda.

- **Robots de 2º Generación**

El movimiento se controla a través de una secuencia numérica almacenada en disco o cinta magnética. Por regla general, este tipo de robots se utiliza en la industria automotriz y son de gran tamaño.

- **Robots de 3º Generación**

Utilizan las computadoras para su control y tienen cierta percepción de su entorno a través del uso de sensores. Con esta generación se inicia la era de los robots inteligentes y aparecen los lenguajes de programación para escribir los programas de control.

- **Robots de 4º Generación**

Se trata de robots altamente inteligentes con más y mejores extensiones sensoriales, para entender sus acciones y captar el mundo que los rodea. Incorporan conceptos “modélicos” de conducta.

- **Robots de 5º Generación**

Actualmente en desarrollo. Esta nueva generación de robots basará su acción principalmente en modelos conductuales establecidos.

También podría decirse que dentro del aspecto generacional nos encontramos con:

- **Robots Play-back**, los cuales regeneran una secuencia de instrucciones grabadas, como un robot utilizado en recubrimiento por spray o soldadura por arco. Estos robots comúnmente tienen un control de lazo abierto.



Figura 2.9.- Robot playback

- **Robots controlados por sensores**, éstos tienen un control en lazo cerrado de movimientos manipulados, y toman decisiones basados en datos obtenidos por sensores.
- **Robots controlados por visión**, donde los robots pueden manipular un objeto al utilizar información desde un sistema de visión.
- **Robots controlados adaptablemente**, donde los robots pueden automáticamente reprogramar sus acciones sobre la base de los datos obtenidos por los sensores.
- **Robots con inteligencia artificial**, donde los robots utilizan las técnicas de inteligencia artificial para hacer sus propias decisiones y resolver problemas.

2.2.3. Nivel de inteligencia

La Asociación de Robots Japonesa (JIRA) ha clasificado a los robots dentro de seis clases sobre la base de su nivel de inteligencia:

- **Dispositivos de manejo manual**, controlados por una persona.
- **Robots de secuencia arreglada**.
- **Robots de secuencia variable**, donde un operador puede modificar la secuencia fácilmente.
- **Robots regeneradores**, donde el operador humano conduce el robot a través de la tarea.
- **Robots de control numérico**, donde el operador alimenta la programación del movimiento, hasta que se enseñe manualmente la tarea.

- **Robots inteligentes**, los cuales pueden entender e interactuar con cambios en el medio ambiente.

2.2.4. Nivel de control

Los programas en el controlador del robot pueden ser agrupados de acuerdo al nivel de control que realizan en tres grupos:

- **Nivel de inteligencia artificial.**

El programa aceptará un comando como "levantar el producto" y descomponerlo dentro de una secuencia de comandos de bajo nivel basados en un modelo estratégico de las tareas.

- **Nivel de modo de control.**

Los movimientos del sistema son modelados, para lo que se incluye la interacción dinámica entre los diferentes mecanismos, trayectorias planeadas, y los puntos de asignación seleccionados.

- **Niveles de servosistemas**

Los actuadores controlan los parámetros de los mecanismos con el uso de una retroalimentación interna de los datos obtenidos por los sensores, y la ruta es modificada sobre la base de los datos que se obtienen de sensores externos. Todas las detecciones de fallas y mecanismos de corrección son implementados en este nivel.

2.2.5. Lenguaje de programación

La clave para una aplicación efectiva de los robots para una amplia variedad de tareas, es el desarrollo de lenguajes de alto nivel. Existen muchos sistemas de programación de robots, aunque la mayoría del software más avanzado se encuentra en los laboratorios de investigación. Los sistemas de programación de robots se dividen en tres clases:

- **Sistemas guiados**, donde el usuario conduce el robot a través de los movimientos a ser realizados.
- **Sistemas de programación de nivel-robot**, donde el usuario escribe un programa de computadora al especificar el movimiento y el sensado.

- **Sistemas de programación de nivel-tarea**, donde el usuario especifica la operación por sus acciones sobre los objetos que el robot manipula.

2.3. Robots móviles

Con la aparición de nuevas tecnologías de planificación y razonamiento automático, de 1966 a 1972 se desarrolló en el SRI el primer robot móvil llamado Shakey [Nilsson, 1984], que era una plataforma móvil independiente controlada por visión mediante una cámara y dotada con un detector táctil. A partir de ese momento, la investigación y diseño de robots móviles (que contaron con características muy diferentes entre ellos) creció de manera exponencial [9].

A principios de la década del setenta, el robot Newt [Hollis, 1977] fue desarrollado por Hollis. El robot Hilare [Giralt, 1979] desarrollado en el LAAS en Francia.

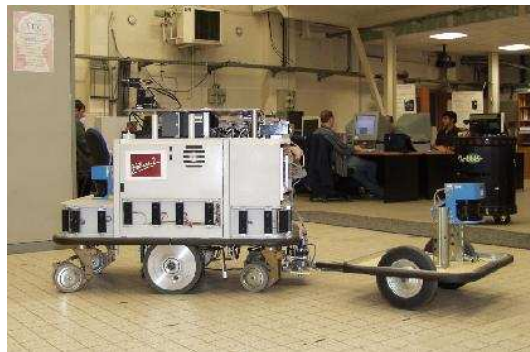


Figura 2.10.- Robot Hilare

En el Jet Propulsion Laboratory (JPL) se desarrolló el Lunar rover [Thompson, 1977], diseñado particularmente para la exploración planetaria. A finales de esa década, Moravec desarrolló el robot Stanford cart [Moravec, 1979], capaz de seguir una trayectoria delimitada por una línea establecida en una superficie, en el SAIL. En 1983, el robot Raibert [Raibert, 1986], fue desarrollado en el MIT, un robot de una sola pata diseñado para estudiar la estabilidad de éstos sistemas. A principios de la década del noventa, Vos *et al.* desarrollaron un robot “uniciclo” [Vos et al., 1990] (una sola rueda, similar a la de una bicicleta) en el MIT.

Años más tarde, en 1994, el Instituto de robótica CMU desarrolló el robot Dante II [Bares et al., 1999], un sistema de seis patas.

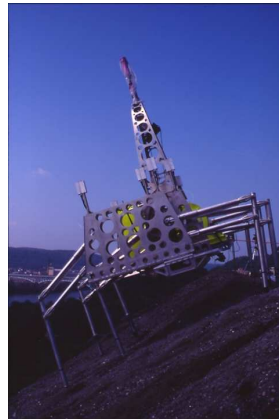


Figura 2.11.- Robot Dante II

En 1996 también en el CMU, se desarrolló el robot Gyrover [Brown et al., 1997], un mecanismo ausente de ruedas y patas basado en el funcionamiento del giroscopio. Ese mismo año se desarrolló en el MIT el Spring Flamingo [Pratt et al., 1998], un robot que emulaba el movimiento de un flamenco. Por su parte, la NASA en 1997 envió a Marte un robot móvil teleoperado llamado Sojourner rover [Muirhead, 1997], dedicado a enviar fotografías del entorno de dicho planeta. Ese mismo año, la empresa japonesa HONDA, dio a conocer el robot P3 [Tanie, 2003], el primer humanoide capaz de imitar movimientos del cuerpo humano. Al siguiente año, se desarrolla en la universidad Waseda en Japón, el WABIAN R-III [Hashimoto, 1998], un robot humanoide. En 1999 en el CMU, Zeglin propuso un nuevo diseño de robot con una pata llamado Bow Leg Hopper [Zeglin, 1999], un diseño que permite almacenar la energía potencial de la pata.

En 2006, Hollis *et al.* desarrollaron el robot Ballbot [Lauwers, 2006], un sistema holónimo cuyo movimiento es proporcionado por una sola esfera ubicada en la parte inferior de la estructura. Sin embargo, el estudio de este tipo de robots con una esfera, fue iniciado por Koshiyama y Yamafuji [Koshiyama et al., 1991] en 1991.



Figura 2.12.- Robot Ballbot

Actualmente los robots teleoperados Spirit rover y Opportunity rover, [Aronson et al, 2001], se encuentran explorando la superficie del planeta Marte en busca de mantos acuíferos. Los robots aquí mencionados, son únicamente una porción de los tantos que se han diseñado, sin embargo, es posible notar que las aplicaciones de estos son vastas y que las mismas son ilimitadas debido al desarrollo cada vez más vertiginoso de la tecnología.

Los robots móviles brindan la posibilidad de navegar en distintos terrenos y tienen aplicaciones como: exploración minera, exploración planetaria, misiones de búsqueda y rescate de personas, limpieza de desechos peligrosos, automatización de procesos, vigilancia, reconocimiento de terreno, y también son utilizados como plataformas móviles que incorporan un brazo manipulador.

Los robots móviles se pueden clasificar por el tipo de locomoción utilizado, en general, los tres medios de movimiento son: por ruedas [Muir et al., 1992], por patas [Todd, 1985] y orugas [Grasnoik et al., 2005]. Cabe señalar que aunque la locomoción por patas y orugas han sido ampliamente estudiadas, el mayor desarrollo se presenta en los Robots Móviles con Ruedas (RMR). Dentro de los atributos más relevantes de los RMR, destacan su eficiencia en cuanto a energía en superficies lisas y firmes, a la vez que no causan desgaste en la superficie donde se mueven y requieren un número menor de partes y menos complejas, en comparación con los robots de patas y de orugas, lo que permite que su construcción sea más sencilla.

Son precisamente estos argumentos los que motivan el análisis de este tipo de robots, y surge la necesidad, en primera instancia, de tener una definición que satisfaga el contexto de los RMR. De esta manera, se puede definir un robot móvil de ruedas como un sistema electromecánico controlado, que utiliza como locomoción ruedas de algún tipo, y que es capaz de trasladarse de forma autónoma a una meta preestablecida en un determinado espacio de trabajo.

Se entiende como autonomía de un robot móvil, al dominio que tiene éste para determinar su curso de acción, mediante un proceso propio de razonamiento en base a sensores, en lugar de seguir una secuencia fija de instrucciones. En lo referente a las partes de las que se compone un RMR, se tiene un arreglo cinemático y un sistema de actuadores. Ambos sistemas están íntimamente ligados y son dignos de estudiarse en conjunto, no obstante, se ha logrado un mayor avance, en el estado del arte, al estudiarlos por separado.



Figura 2.13.- Grupo de robots móviles

2.3.1. Configuraciones cinemáticas de los RMR

Existen diferentes configuraciones cinemáticas para los RMR [Azcon, 2003], estas dependen principalmente de la aplicación hacia donde va enfocado, no obstante, de manera general se tienen las siguientes configuraciones: Ackerman, triciclo clásico, tracción diferencial, skid steer, síncrona y tracción omnidireccional.

Dependiendo de la configuración cinemática que lo conforme, los RMR utilizan cuatro tipos de ruedas para su locomoción [Goris, 2005], estas son: convencionales, tipo castor, ruedas de bolas y omnidireccionales.

En el marco de las configuraciones cinemáticas posibles y las ruedas que estas utilizan, los RMR documentados en la literatura utilizan comúnmente la configuración de tracción diferencial, donde se utilizan ruedas convencionales, como ruedas motrices y una o dos ruedas tipo castor, de bola, u omnidireccionales, respectivamente, para proveer de estabilidad al móvil.



Figura 2.14.- Configuración de los RMR



Figura 2.15.- Ruedas utilizadas en los RMR

Una variante de la configuración de tracción diferencial muy conveniente, que utiliza el robot Shakey, es la que cuenta con dos ruedas motrices, que reduce costos de desarrollo y complejidad de control porque es suficiente un par de actuadores para lograr movimiento, también incorpora dos ruedas de bola, que se encuentran diametralmente opuestas y que además de brindar estabilidad al móvil, simplifican el movimiento de giro total a sólo invertir el sentido de giro de las ruedas motrices, por lo que no es necesaria propiamente la rotación y por lo tanto el control de ese movimiento es bastante más sencillo.

Con el objeto de hacer más tratable el problema del modelado en las configuraciones cinemáticas, se suelen establecer algunas suposiciones de diseño y de operación [Muir et al., 1992]. Por una parte, dentro de las suposiciones de diseño generalmente se toman tres. La primera va dirigida a considerar que las partes dinámicas del RMR son insignificantes i.e., que no contiene partes flexibles, de esta manera pueden aplicarse mecanismos de cuerpo rígido para el modelado cinemático. La segunda limita que la rueda tenga a lo más un eslabón de dirección, con la finalidad

de reducir la complejidad del modelado. La tercera es asumir que todos los ejes de dirección son perpendiculares a la superficie, de esta manera se reducen todos los movimientos a un solo plano.

Por otra parte, respecto a las suposiciones de operación, al igual que en las de diseño, se toman tres. Una de ellas descarta toda irregularidad de la superficie donde se mueve el RMR. Otra, considera que la fricción de traslación en el punto de contacto de la rueda con la superficie donde se mueve, es lo suficientemente grande para que no exista un desplazamiento de traslación del móvil. Como complemento a lo anterior, una tercer suposición de operación establece que la fricción rotacional en el punto de contacto de la rueda con la superficie donde se mueve, es lo suficientemente pequeña para que exista un desplazamiento rotatorio.

Aunque las suposiciones mencionadas son realistas, el deslizamiento que ocurre en el punto de contacto de las ruedas con la superficie se ha convertido en un tópico importante debido a las repercusiones que tiene sobre el móvil.

2.3.2. Actuadores en los RMR

Relativo a los actuadores utilizados para dotar de movimiento a los RMR, es común que se utilicen motores. Existe una gama bastante amplia dependiendo de su empleo [Sandin, 2005], los más utilizados en la robótica móvil son los de corriente directa (CD), por el argumento de que su modelo es lineal, lo que facilita enormemente su control, y específicamente los de imán permanente debido a que el voltaje de control es aplicado al circuito de armadura y el circuito de campo es excitado de manera independiente.

Hablando de motores de CD de imán permanente, se tienen dos tipos: con escobillas y sin escobillas. Ambos tipos brindan ventajas semejantes, sin embargo, los motores sin escobillas tienen algunas ventajas significativas sobre los motores con escobillas, como por ejemplo:

- Al no contar con escobillas, no se requiere el reemplazo de éstas ni mantenimiento por residuos originados de las mismas.
- No presentan chispas que las escobillas generan, de esta forma se pueden considerar más seguros en ambientes con vapores o líquidos inflamables.
- La interferencia causada por la conmutación mecánica de las escobillas se minimiza considerablemente mediante una conmutación electrónica.
- Los motores sin escobillas alcanzan velocidades de hasta 50.000 rpm comparadas con las 5.000 rpm aprox. máximas de los motores con escobillas.

A pesar de que estas ventajas parecieran tender la balanza a favor de los motores sin escobillas, existen desventajas cruciales que pueden cambiar la tendencia:

- En los motores sin escobillas no se puede invertir el sentido de giro cambiando la polaridad de sus terminales, esto agrega complejidad y costo a su manejo.
- Los motores sin escobillas son más caros.
- Se requiere un sistema adicional para la conmutación electrónica.

- El controlador de movimiento para un motor sin escobillas es más costoso y complejo que el de su equivalente con escobillas. Al igual que en el arreglo cinemático, cuando se modela un motor de CD se asumen algunas consideraciones, de esta forma se establece que la única fricción presente es la viscosa, aunque en la práctica se involucran otros tipos de fricción no lineales, sin embargo, la suposición es válida al elegir un motor cuyo efecto de las fricciones no lineales sea muy pequeño.

2.3.3. Control de los RMR

En tiempos actuales, el tema del control de los RMR ha venido acaparando la atención de gran cantidad de investigadores. Desde el punto de vista de la teoría de control, estos se encuentran en el área que se conoce como control de sistemas no holónomos, estos sistemas se caracterizan por tener un número menor de grados de libertad controlables respecto al número de grados de libertad totales, en el caso de un RMR de tracción diferencial, el número total de grados de libertad son 3 (posición x, y y su orientación φ) sin embargo únicamente se puede controlar el desplazamiento hacia adelante y hacia atrás así como su orientación, quedando como incontrolable el desplazamiento transversal.

Matemáticamente se dice que el sistema esta sujeto a restricciones no integrables en las velocidades, es decir, su plano de velocidades está restringido. El control del movimiento de los RMR, a grosso modo, se puede clasificar en cuatro tareas fundamentales; localización, planificación de trayectoria, seguimiento de la misma y evasión de obstáculos. Existen diversos trabajos donde se han estudiado estos tópicos de manera detallada, no obstante, sólo se mencionarán los más relevantes relativos.

2.4. Historia de las motos RC

Ya hacia 1980 aparecieron las primeras motos R/C (Graupner, Kyosho, etc), por entonces eléctricas y con variador constituido por un simple reóstato, sin fines competitivos [10].

Es en 1985 cuando una fábrica italiana (DWA) saca al mercado una moto escala 1/4 con motor de explosión de 3.5 cc, la DWA Comando, orientada a la competición.

Tiene un relativo éxito, sobre todo en Italia, y se disputaron campeonatos europeos entre 1986 y 1989, así como muchas competiciones en Italia y también en España.



Figura 2.16.- DWA Commando

La moto DWA Comando con el tiempo manifestó importantes carencias o defectos, que fueron paliados o solucionados por sus usuarios:

- Sistema de dirección con dos servos que hacía la horquilla girar, además de en un eje casi vertical como el de una moto real, en un eje horizontal.
- Falta de un verdadero depósito que permitiese un rápido y cómodo repostaje.
- Amortiguador trasero deficiente.
- Corona de transmisión excesivamente grande, que rozaba en el suelo al inclinar la moto.
- Volante de inercia oculto que no permitía el arranque. Éste se hacía con un adaptador roscado en la punta del cigüeñal (que había que serrar). Se utilizaba un arrancador externo similar al de los coches, movido por batería.
- Carencia de freno y suspensión delanteros. Éstas fueron opciones de fábrica posteriores, si bien añadiendo un servo para el freno delantero. La moto llegó a requerir cuatro servos: dos para la horquilla, otro para carburador y freno trasero, y otro para freno delantero.

La principal evolución fue en el sistema de dirección, que se explicará con detalle más adelante. El resto evolucionó así:

- Depósito: se añadían verdaderos tapones cortando el depósito de serie, o éste se construía entero en latón.

- Amortiguadores: se adaptaron amortiguadores de coches de todo terreno, tanto el trasero como el delantero.
- Corona de transmisión: fue posible localizar coronas de coches de pista con el mismo anclaje y de menos dientes, así como el piñón correspondiente en su campana de embrague.
- Volante: el volante y el adaptador de arranque se sustituyeron por un volante de inercia usado en coches con forma de gorro chino, que posibilitaba el uso del mismo arrancador, sin necesidad de cortar el cigüeñal, y utilizar motores con cigüeñal tipo SG.
- Freno delantero: con el tiempo se vio su absoluta necesidad, pues la moto, sólo con el freno trasero, era simplemente imparable, y muy inestable si se bloqueaba la rueda trasera (se anulaba el giróscopo trasero). La opción de fábrica que requería un servo adicional se modificó, siendo un único servo el que accionaba carburador y frenos trasero y delantero, éste último por cable. El disco delantero único de la opción de fábrica se pudo sustituir con dos discos finos y tres pastillas.

La principal evolución fue en el sistema de dirección, que fue radicalmente transformado hasta llegar al utilizado en las motos R/C actuales. El sistema de dirección inicial hacía girar, mediante dos servos en el canal de dirección, la horquilla, además de en un eje casi vertical como el de una moto real, en un eje horizontal: la horquilla hacía un "barrido". De hecho, el neumático delantero era macizo, buscando un alto momento de inercia, con forma de pico, y su eje de giro estaba atrasado respecto a los brazos de la horquilla. Al hacer la horquilla su movimiento de barrido, en la práctica, debido al elevado momento cinético de la rueda delantera, ésta mantenía su verticalidad y era el resto de masas de la moto el que se desplazaba, moviendo una masa que tumbaba la moto y, con el movimiento normal de la horquilla en su eje casi vertical, provocaba que la moto tumbase y girase.

El sistema era efectivo pero requería un ajuste continuo: había que "apretar" los servos contra la pieza que movía la horquilla para evitar holgura en el movimiento de barrido, lo que provocaba un fuerte consumo de corriente y requería servos de alto par. Además, la moto resultaba perezosa: costaba tumbarla y levantarla, y el sistema no tenía ajuste posible. Una mejora fue añadir en la parte alta de la horquilla una chapa con corte en V, y un alambre de acero doblado a 90° solidario al chasis que finalizaba en el hueco de la V: al girar y realizar la horquilla el movimiento de barrido, la V alcanzaba el alambre y hacía girar la horquilla al contrario del giro pretendido, lo que contribuía a tumbar la moto. Con el grosor del alambre y la posición de la V se tenía un cierto ajuste.

En 1987 el danés J. Jorgensen da con una idea más sencilla, y que, a pesar de ser un sistema muy diferente, era fácil adaptar al sistema de serie:

- Bloquea el movimiento de barrido de la horquilla (eje horizontal), sin más que invertir una pieza de la moto.
- Sustituye los dos servos de dirección por un único servo con dos varillas a la horquilla, que la hacen girar mediante dos muelles, ajustables con collarines.
- Para girar la moto hacia un lado el servo de dirección hace girar la horquilla al lado contrario y la moto cae del lado al que queremos girar. Los muelles permiten que la horquilla quede en su ángulo correcto una vez que la moto ha tumbado.

El sistema es definitivo: se terminan los problemas de consumo y holguras de dirección, y ésta es ajustable (muelles blandos para aprender, si la moto se nota nerviosa, o para circuitos de curvas amplias, y se endurecen los muelles mediante los collarines si se tiene experiencia o en circuitos con muchas curvas). El sistema de muelles con los que el servo de dirección mueve la horquilla constituye un salvaservos natural. El servo de dirección no requiere ser de par alto y puede incluso utilizarse un miniservo.

En 1988 se mejora el sistema de Jorgensen con una pieza nueva que constituye un salvahorquillas y que evita debilidades estructurales en la modificación de Jorgensen (en las motos actuales se conoce como "cabeza del caballo"). El servo de dirección se baja, así como las varillas a la horquilla.

El sistema de Jorgensen y el salvahorquillas han prevalecido hasta hoy día, normalmente con varilla única al servo de dirección, que aloja los dos muelles, y con amortiguador con aceite para amortiguar las vibraciones de la horquilla, que puede ser:

- Varilla con muelles con el pistón del amortiguador solidario con la varilla.
- Varilla y amortiguador independientes.

Salvo la aparición de neumáticos PMT para la moto DWA Comando, ligeramente mejores que los de serie, ésta no evolucionó más y dejó de fabricarse. Su mérito histórico fue ser la base de desarrollo y mejoras durante tres años de la moto R/C hasta las motos actuales.

En la década de los 90, y del 2000 en adelante aparecen otros fabricantes de motos (Nuova Faor, Thunder Tiger, AR Modelling, KP, etc), que redefinen la moto actual:

- Se abandona la escala 1/4 para motos de pista, y casi todas las motos de pista fabricadas son de escala 1/5.
- En motos de explosión se abandona el motor de 3.5 cc en favor del de 2.1 cc (0.12 c.u.). Para simplificar el arranque, al cigüeñal se le incorpora un rodamiento "one-way" y el arranque puede ser:
 - Por tirador.
 - Por "rotostart": un motor eléctrico externo con reductora, movido por un paquete de seis elementos de NiCd o NiMH similar al utilizado en tracción de coches eléctricos.
- Frenos movidos por cable.
- Se populariza la moto eléctrica, también en escala 1/5, más simple al no llevar embrague, escape, carburación, depósito, sistema de arranque, etc. Se populariza el uso de motores sin escobillas (no utilizando marcha atrás) y baterías LiPo. El freno en las motos eléctricas puede ser sólo eléctrico a la rueda trasera (la moto sólo llevaría un servo para la dirección), o además mecánico, requiriendo otro servo, y actuando sólo sobre la rueda delantera, o sobre ambas ruedas delantera y trasera.
- Aparecen realizaciones artesanales con motores de explosión de cuatro tiempos.
- Aparecen motos para circuitos de tierra en escala 1/4, tanto eléctricas (2007) como de explosión (2008).
- Aparecen motos eléctricas para pista en escala 1/8.



Figura 2.17.- Thunder Tiger escala 1:5



En junio de 2006 se celebra en Brookland (Inglaterra) el primer campeonato del mundo de motos R/C de pista escala 1/5, que es seguido en septiembre de 2007 por el celebrado en el Miniautódromo Jody Schekter (Fiorano, Italia) en sus tres categorías ("Stockbike", "Superbike" y "Nitrobike"), aunque casi todos los participantes son europeos. En España se celebra en 2008 el primer campeonato nacional de motos R/C de pista en el circuito de Cerdanyola y el mundial de 2008 se celebra en el circuito Autet.



Capítulo 3. *Sistema mecánico*

3.1. Estructura de la moto

La moto escogida para el proyecto es una moto modelo ARX-540 de escala 1:4, con un peso de 3,2 KG. y unas dimensiones de 52 x 18 x 30 cm [2].



Figura 3.1.- Moto de automodelismo ARX-540

3.1.1. Bastidor

El bastidor está formado por cuatro láminas, dos superiores y dos inferiores, fabricadas con 2 mm de aluminio mediante tecnología de corte láser seguido de un tratamiento de anodización negra, unidos mediante pernos de 6 mm de acero y arandelas de aluminio creado a partir de bloques sólidos con tecnología CNC.

La tecnología CNC, también conocida como “Control Numérico por Computadora”, se basa en el control de los movimientos de la herramienta de trabajo con relación a los ejes de coordenadas de la máquina, usando un programa informático ejecutado por un ordenador.

La estructura está diseñada para crear una parte superior del bastidor más ligera, lo que significa un centro de gravedad más bajo, para obtener una buena estabilidad y una capacidad de dirección perfecta en cualquier tipo de superficie.

La parte superior del bastidor es ideal para colocar la electrónica, el microcontrolador y el servo, ya que está lejos de la superficie y protegida de agua, barro, arena y escombros. En la parte inferior del bastidor es donde se coloca el motor brushless y la batería. Unos separadores de aluminio son utilizados para resistir a la tensión de torsión producida durante una conducción extrema.



Figura 3.2.- Bastidor

3.1.2. Horquilla delantera

La horquilla con resorte está atornillada a la estructura a través de dos abrazaderas de plástico CNC y dos bielas reforzadas y montado sobre un cojinete compuesto por ocho bolas para crear un efecto de dirección suave y preciso.

En la parte delantera algunos componentes son fabricados a partir de bloques de aluminio sólido con la tecnología CNC y otras por la tecnología de moldeo por inyección. Tanto en el aluminio como en las piezas de tecnopolímero, las tolerancias se reducen al mínimo para obtener una mayor suavidad durante la compresión y extensión de la horquilla.

La dirección responde rápidamente y el conjunto se mantiene sólido.



Figura 3.3.- Horquilla delantera

3.1.3. Basculante trasero

El basculante trasero se divide en tres partes: dos brazos fabricados utilizando la tecnología de fundición a presión y una parte central producida mediante tecnología de moldeo por inyección en tecnopolímero.



Figura 3.4.- Parte trasera

3.1.4. Suspensión trasera

La suspensión trasera está formada mediante un amortiguador de aluminio. Es posible seleccionar hasta seis posiciones diferente para fijar el amortiguador a la estructura con el fin de regular la altura y el comportamiento del amortiguador.

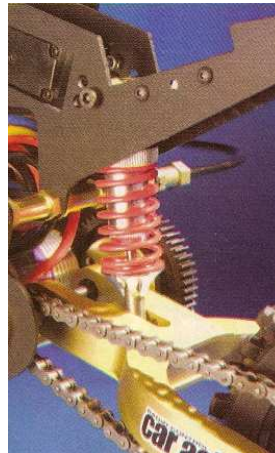


Figura 3.5.- Suspensión trasera

3.1.5. Soporte de dirección

Para que el centro de la rueda delantera esté colocada correctamente, se utiliza un vínculo de dirección de doble resorte como se puede ver en la *figura 3.6*. Acoplado a un extremo del cuerno del servo, es un elemento deslizante que se coloca en la barra de dirección entre dos muelles.



Figura 3.6.- Vínculo de dirección de doble resorte



Figura 3.7.- Soporte de dirección

3.1.6. Transmisión

Para transmitir la fuerza del motor brushless a la rueda trasera se utiliza un sistema de transmisión mediante engranajes y un mecanismo piñón cadena. El conjunto de estos sistemas de transmisión a su vez actúan como reductora.

El primer sistema de transmisión consiste en un engranaje (piñón) unido al eje del motor brushless que transmite su fuerza a un segundo engranaje (corona) el cual está unido a un eje situado en el bastidor de la moto haciendo que éste gire.



Figura 3.8.- Transmisión motor eje

El otro sistema de transmisión es un mecanismo piñón cadena, el cual nos permite transmitir un movimiento giratorio entre dos ejes paralelos que están separados. El mecanismo consta de una cadena sin fin cuyos eslabones engranan con las ruedas dentadas que están unidas a los ejes de los mecanismos conductor y conducido, en nuestro caso el eje situado en el bastidor y la rueda trasera.



Figura 3.9.- Transmisión eje rueda

3.1.7. Neumáticos

Los neumáticos están fabricados con un diseño que permite su uso en diferentes tipos de terrenos. Estos neumáticos han surgido gracias a la colaboración con el renombrado fabricante GRP. En la *figura 3.8* se puede ver una imagen del neumático utilizado en la moto.



Figura 3.10.- Neumático

3.1.8. Carcasa

La moto dispone de una carcasa metálica situada en la parte superior, sujeta a la moto mediante unas bridas. Está formada por una base de 17 x 8,5 cm y una carcasa superior de 15 x 8,8 x 3,5 cm. En el interior se ubica la parte de control, una pila de 9 V y una pequeña etapa de potencia. Dicha carcasa se encarga principalmente de la protección del microcontrolador frente agentes externos tales como grava, aire o arena que puedan afectar durante su funcionamiento.

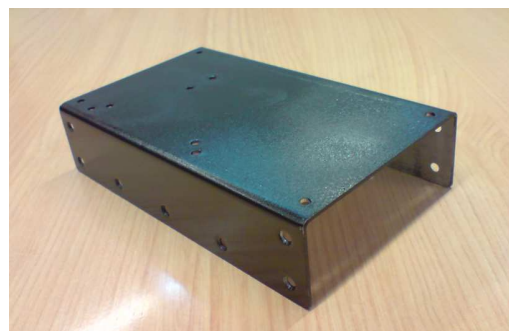


Figura 3.11.- Carcasa

3.1.9. Barras antivuelco

Las barras antivuelco son un elemento de seguridad a destacar. Estas dos finas barras de plástico de 25 cm de longitud van situadas una a cada lado de la moto, en forma de arco, para proteger y no dañar su estructura en caso de realizar una curva demasiado cerrada o sufrir una caída, actuando como tope contra el suelo.

3.1.10. Esquema general

A continuación se muestra un esquema general de la moto ya montada, donde se numera cada una de sus partes mecánicas para poder ubicarlas y diferenciarlas dentro de la misma.

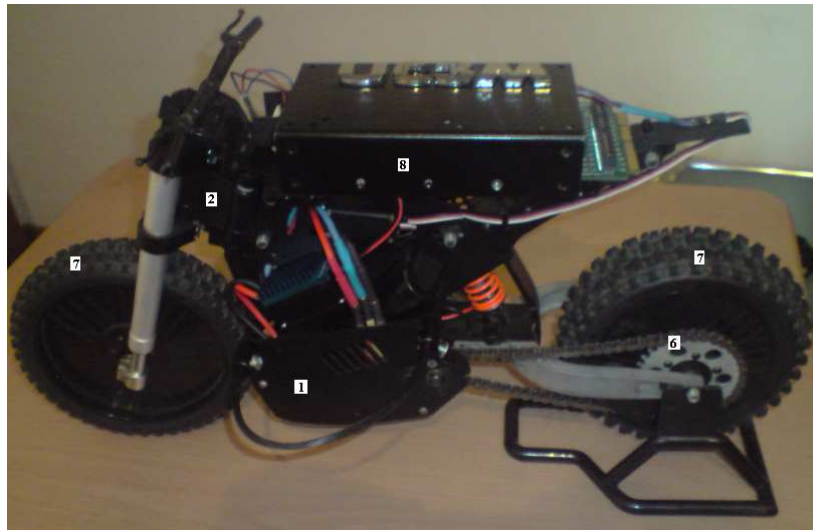


Figura 3.12.- Lateral izquierdo moto



Figura 3.13.- Lateral derecho moto



Donde:

- 1.- Bastidor
- 2.- Horquilla delantera
- 3.- Basculante trasero
- 4.- Suspensión trasera
- 5.- Soporte de dirección
- 6.- Transmisión
- 7.- Neumáticos
- 8.- Carcasa
- 9.- Barra antivuelco



Capítulo 4. **Sistema electrónico**

4.1. Motor brushless

4.1.1. Introducción

Un motor eléctrico sin escobillas o motor brushless es un motor eléctrico que no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor [11].

Los motores eléctricos solían tener un colector de delgas o un par de anillos rodantes. Estos sistemas, que producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor y ruido, requieren mucho mantenimiento y pueden producir partículas de carbón que manchan el motor de un polvo que, además, puede ser conductor.

Los primeros motores sin escobillas fueron los motores de corriente alterna asíncronos. Hoy en día, gracias a la electrónica, se muestran muy ventajosos, ya que son más baratos de fabricar, pesan menos y requieren menos mantenimiento, pero su control era mucho más complejo. Esta complejidad prácticamente se ha eliminado con los controles electrónicos.

El inversor debe convertir la corriente alterna en corriente continua, y otra vez en alterna de otra frecuencia. Otras veces se puede alimentar directamente con corriente continua, eliminando el primer paso. Por este motivo, estos motores de corriente alterna se pueden usar en aplicaciones de corriente continua, con un redimiendo mucho mayor que un motor de corriente continua con escobillas. Algunas aplicaciones serían los coches y aviones con radio control, que funcionan con pilas.

Otros motores sin escobillas, que sólo funcionan con corriente continua son los que se usan en pequeños aparatos eléctricos de baja potencia, como lectores de CD-ROM, ventiladores de ordenador, cassetes, etc. Su mecanismo se basa en sustituir la conmutación (cambio de polaridad) mecánica por otra electrónica sin contacto. En este caso, la espira sólo es impulsada cuando el polo es el correcto, y cuando no lo es, el sistema electrónico corta el suministro de corriente. Para detectar la posición de la espira del rotor se utiliza la detección de un campo magnético. Este sistema electrónico, además, puede informar de la velocidad de giro, o si está parado, e incluso cortar la corriente si se detiene para que no se queme. Tienen la desventaja de que no giran al revés al cambiarles la polaridad (+ y -). Para hacer el cambio se deberían cruzar dos conductores del sistema electrónico.

Un sistema algo parecido, para evitar este rozamiento en los anillos, se usa en los alternadores. En este caso no se evita el uso de anillos rodantes, sino que se evita

usar uno más robusto y que frenaría mucho el motor. Actualmente, los alternadores tienen el campo magnético inductor en el rotor, que induce el campo magnético al estator, que a la vez es inducido. Como el campo magnético del inductor necesita mucha menos corriente que la que se va generar en el inducido, se necesitan unos anillos con un rozamiento menor. Esta configuración la usan desde pequeños alternadores de coche hasta los generadores de centrales con potencias del orden del megavatio.

Estos motores trabajan gracias a los variadores de velocidad (speed control), que transforman la corriente continua de las baterías en una tensión alterna trifásica.

Se puede invertir el sentido de rotación fácilmente con solo invertir entre si dos de los tres cables que unen al speed con el motor.

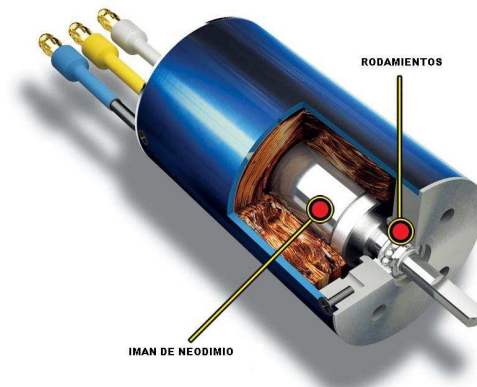


Figura 4.1.- Motor brushless

4.1.2. Principio de funcionamiento

En un motor de corriente continua con escobillas, se obtiene par motor gracias a la interacción del campo magnético inductor, estacionario, y la intensidad del arrollamiento inducido giratorio [12]. Campo y corriente eléctrica se mantienen siempre en la misma posición relativa gracias al mecanismo de conmutación formado por el colector de delgas y las escobillas. En motores de pequeña potencia suele obtenerse la excitación mediante imanes permanentes. En este caso, solo se dispone de dos terminales para el control y la alimentación del motor. Las relaciones básicas electromecánicas son en este caso las siguientes:

$$T_m = K \cdot i$$

$$E = K \cdot \Omega$$

Siendo, T_m : Par motor; i : intensidad de inducido; E : tensión inducida; Ω : velocidad angular

El hecho de tener control directo sobre el par mediante la intensidad de inducido, y sobre la velocidad a través de la tensión, convierte a este motor en el modelo de referencia para la regulación de velocidad. No obstante, la alimentación del inducido a través de las escobillas y el colector presenta muchos inconvenientes, hasta el punto que en algunos casos se hace inviable su utilización.

El motor que nos ocupa es similar al de corriente continua con escobillas, con las siguientes salvedades: a) la conmutación se realiza de forma electrónica en lugar de mecánica; b) los imanes permanentes van alojados en el rotor en lugar de en el estator y c) las bobinas van alojadas en el estator, constituyendo un devanado monofásico o polifásico.

Su funcionamiento se basa en la alimentación secuencial de cada una de las fases del estator de forma sincronizada con el movimiento del rotor. De esta forma, los imanes permanentes siguen el movimiento del campo magnético estático, cuyo desplazamiento depende a su vez del giro del rotor.

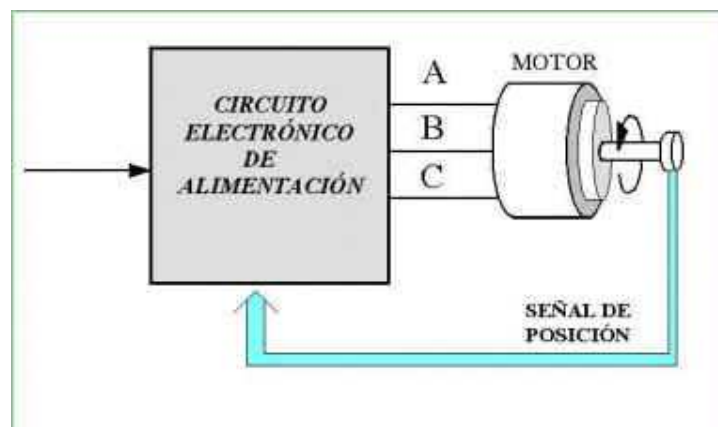


Figura 4.2.- Esquema de funcionamiento de un motor de corriente continua sin escobillas

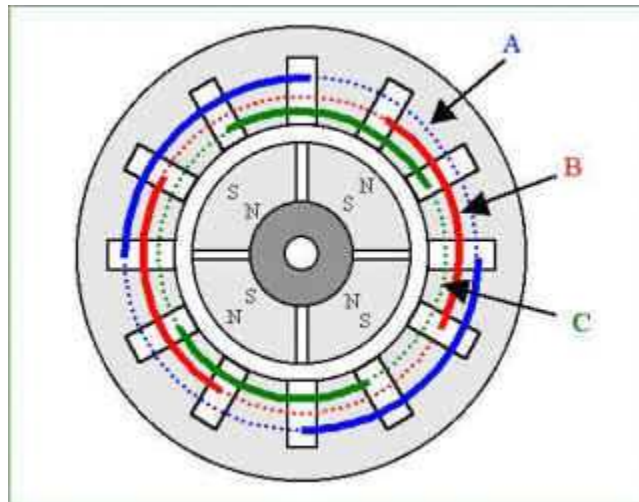


Figura 4.3.- Aspecto de un motor de corriente continua sin escobillas trifásico

La figura muestra la configuración más empleada de la etapa de potencia. Se compone de seis transistores de potencia MOSFETs o IGBTs, dependiendo de la tensión de alimentación. Para la regulación de velocidad se emplea la técnica PWM con portadora de alta frecuencia.

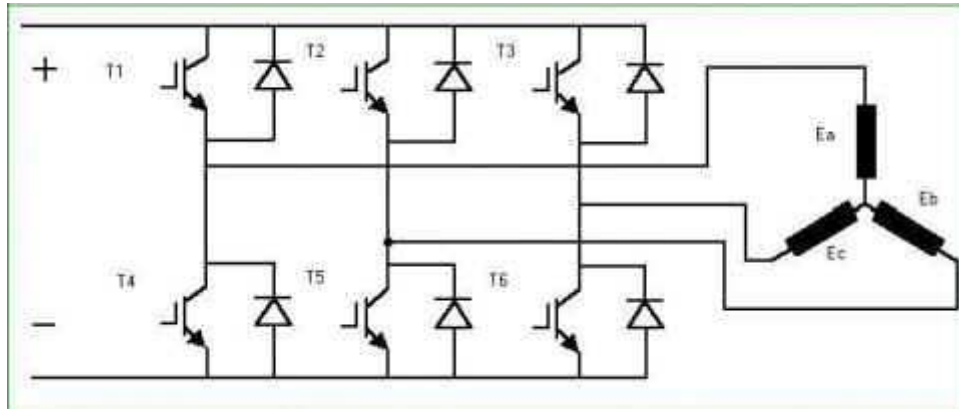


Figura 4.4.- Inversor trifásico en puente con IGBTs

4.1.3. Características técnicas

Motor brushless modelo KB36-50-XXS-Fin de 5900 KV [13].

RPM/V	5900 KV
Peso	252 g
Tamaño del eje	Φ 5.0 mm \times 16 mm
Dimensiones del motor	Φ 35.8 mm \times 51 mm
Corriente reactiva	6,9 A
Resistencia [Ri]	0.0034 Ω
Corriente máxima	108 A

Tabla 4.1.- Características técnicas motor brushless



Figura 4.5.- Motor brushless KB36-50-XXS-Fin de 5900 KV

4.2. Servomotor

4.2.1. Introducción

Los servos son sin duda uno de los dispositivos mas útiles para cualquier aficionado a la robótica, ya que nos permiten crear toda clase movimientos de una forma controlada [14]. Lo que normalmente se denomina servo también se conoce como servomotor, motor servo controlado o incluso servorc, y en cualquier caso hacen referencia a un sistema compuesto por un motor eléctrico, un sistema de regulación que actúa sobre el motor y un sistema de sensor que controla el movimiento del motor. Es precisamente este sensor el que marca la diferencia con respecto a un motor

controlado electrónicamente, ya que gracias a la información obtenida del sensor, se puede saber en tiempo real lo que está haciendo un motor.



Figura 4.6.- Servomotor

4.2.2. Definición y estructura

Un servomotor (o servo) es un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ser controlado en posición. Es capaz de ubicarse en cualquier posición dentro de un rango de operación (generalmente de 180°) y mantenerse estable en dicha posición. Los servos se suelen utilizar en robótica, automática y modelismo (vehículos por radio-control, RC) debido a su gran precisión en el posicionamiento.

En general, los servos suelen estar compuestos por 4 elementos fundamentales:

- **Motor de corriente continua (DC):** Es el elemento que le brinda movilidad al servo. Cuando se aplica un potencial a sus dos terminales, este motor gira en un sentido a su velocidad máxima. Si el voltaje aplicado sus dos terminales es inverso, el sentido de giro también se invierte.
- **Engranajes reductores:** Tren de engranajes que se encarga de reducir la alta velocidad de giro del motor para acrecentar su capacidad de torque (o par-motor).
- **Sensor de desplazamiento:** Suele ser un potenciómetro colocado en el eje de salida del servo que se utiliza para conocer la posición angular del motor.

- **Circuito de control:** Es una placa electrónica que implementa una estrategia de control de la posición por realimentación. Para ello, este circuito compara la señal de entrada de referencia (posición deseada) con la posición actual medida por el potenciómetro. La diferencia entre la posición actual y la deseada es amplificada y utilizada para mover el motor en la dirección necesaria para reducir el error.

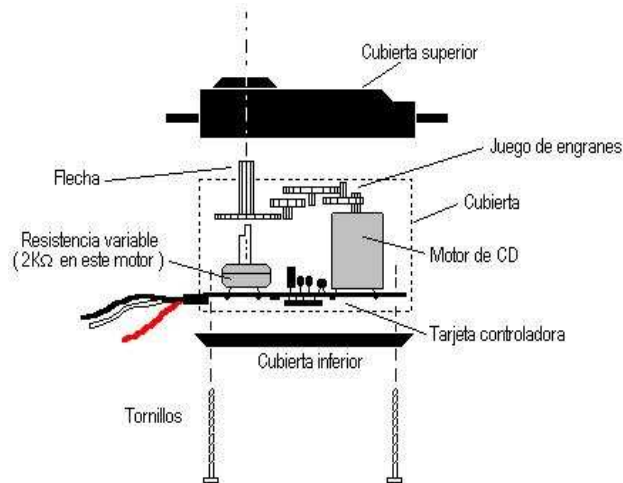


Figura 4.7.- Estructura típica

4.2.3. Principios de funcionamiento

Las señales PWM utilizadas para controlar los servos están formadas por pulsos positivos cuya duración es proporcional a la posición deseada del servo y que se repiten cada 20ms (50Hz). Todos los servos pueden funcionar correctamente en un rango de movimiento de 90°, que se corresponde con pulsos PWM comprendidos entre 0.9 y 2.1ms. Sin embargo, también existen servos que se pueden mover en un rango extendido de 180° y sus pulsos de control varían entre 0.5 y 2.5ms (Figura 3). Antes de utilizar un servo habrá que comprobar experimentalmente su rango de movimiento para no dañarlo. Para mantener fijo un servo en una posición habrá que enviar periódicamente el pulso correspondiente; ya que si no recibe señales, el eje del servo quedará libre y se podrá mover ejerciendo una leve presión.

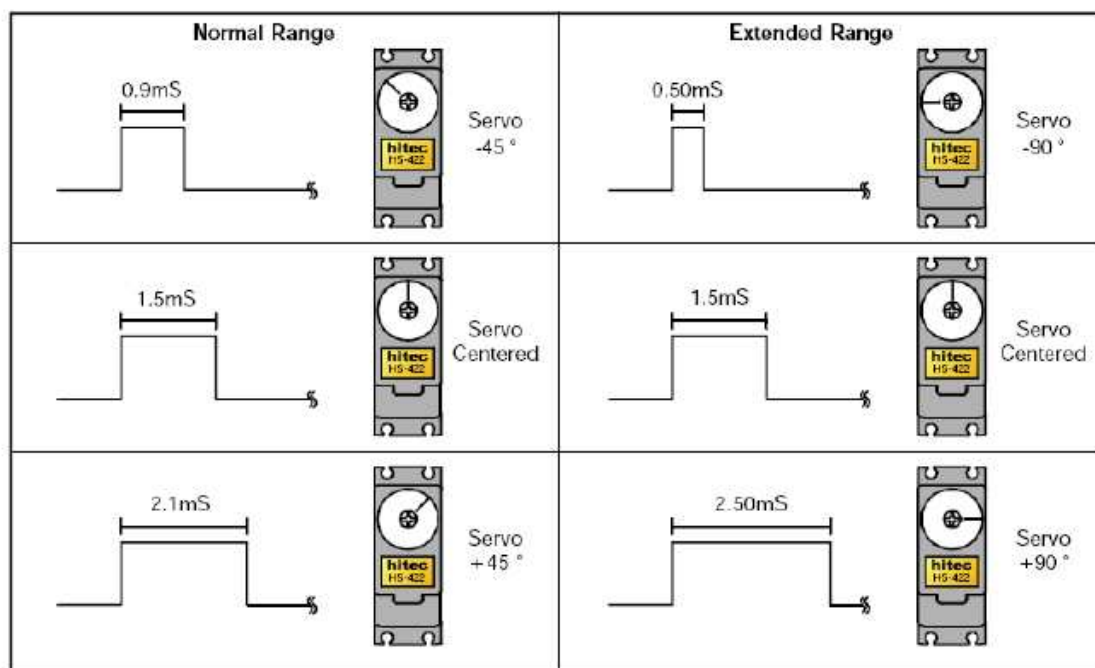


Figura 4.8.- Pulsos PWM para controlar servos

Los servos disponen de tres cables: dos cables de alimentación (positivo y negativo/masa) que suministran un voltaje 4.8-6V y un cable de control que indica la posición deseada al circuito de control mediante señales PWM ("Pulse Width Modulation"). La mayoría de los conectores utilizan un sistema de 3 hilos acabados en un conector con separación entre pines de 0,1 pulgadas (2,54 mm) que encajan sin problemas en los conectores tipo poste que tienen los circuitos de control de servos. Según el fabricante el color para diferenciar los cables puede variar.



Figura 4.9.- Color de los cables según el fabricante

Fabricante	Duración del pulso [ms]			Frec. [Hz]	Color de los cables		
	Mínima (0°)	Neutral (90°)	Máxima (180°)		Positivo	Negativo	Control
Futaba	0.9	1.5	2.1	50	Rojo	Negro	Blanco
Hitech	0.9	1.5	2.1	50	Rojo	Negro	Amarillo
Graupner/Jr	0.8	1.5	2.2	50	Rojo	Marrón	Naranja
Multiplex	1.05	1.6	2.15	40	Rojo	Negro	Amarillo
Robbe	0.65	1.3	1.95	50	Rojo	Negro	Blanco
Simprop	1.2	1.7	2.2	50	Rojo	Azul	Negro

Tabla 4.2.- Características técnicas de algunas marcas de servo

4.2.4. Tamaño y potencia

Hasta hace muy poco tiempo la única clasificación que había de los servos era la relativa a su tamaño. Todos los servos funcionaban de la misma forma y lo único que los diferenciaba era el tamaño de los mismos. Dentro de esta clasificación están los servos estándar que incluye a la mayoría de los servos y que se trata de servos cuyas medidas son 40 x 20 x 37 mm. Las medidas varían en algunas décimas de unos modelos a otros, pero en general las medidas de los orificios de fijación coinciden en casi todos los modelos, lo que ha permitido crear soportes y fijaciones universales que pueden utilizarse con la mayoría de los servos.

Una característica de los servos estándar es la posición del eje de salida, si bien las medidas de la altura del servo pueden variar de un modelo, la distancia entre las fijaciones y el plato del servo suele ser muy parecida en la mayoría de los modelos. La potencia de estos servos varía entre los 3 Kg. y los 24 Kg.

Otros servos de mayor tamaño son los servos de escala 1/4 que se empleaban en modelos de coches a escala 1:4 y en general donde hacen falta servos mas robustos y con mayor potencia. Estos servos se empleaban sobre todo en modelos en donde el peso no era tan problemático y sobre todo hacia falta mucha potencia como en el caso de la dirección de los coches de 4x4 de gran potencia o los barcos a vela grandes en los que la tensión de las velas puede ser bastante alta. Hoy en día se encuentran sustitutos de estos servos con igual o superior potencia en tamaños estándar, gracias al control digital. La potencia de estos servos varía entre 9 Kg. y 24 Kg.

En robótica los servos pequeños se emplean sobre todo en las pinzas de los robots, ya que proporcionan la fuerza necesaria para mover la pinza con el mínimo peso. Otra aplicación es la construcción de robots miniaturas en la que los servos estándar son demasiado grandes. Dentro de los servos miniaturas se encuentran hoy

en día muchos tamaños desde los mini, los ultra mini y los micro servos con apenas 8 gramos de peso. Su rango de potencia está entre los 0,5 Kg. y los 3,5 Kg.

4.2.5. Características técnicas

Servomotor Toyabi

Peso	38g/1.34oz
Par de torsión	5.0V 3kg-cm
Velocidad	5.0V/0.22sec/60"
Tamaño (mm)	39.5x20.0x35.6
Engranaje	4P

Tabla 4.3.- Características técnicas servomotor



Figura 4.10.- Servo Toyabi 3 Kg.

4.3. Variador o regulador electrónico de velocidad

4.3.1. Introducción

El Variador de Velocidad (VSD, por sus siglas en inglés Variable Speed Drive) es en un sentido amplio un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores.

En ocasiones es denominado mediante el anglicismo Drive. La maquinaria industrial generalmente es accionada a través de motores eléctricos, a velocidades constantes o variables, pero con valores precisos. No obstante, los motores eléctricos generalmente operan a velocidad constante o cuasi-constante, y con valores que dependen de la alimentación y de las características propias del motor, los cuales no se pueden modificar fácilmente. Para lograr regular la velocidad de los motores, se emplea un controlador especial que recibe el nombre de variador de velocidad.

Un variador de velocidad puede consistir en la combinación de un motor eléctrico y el controlador que se emplea para regular la velocidad del mismo. La combinación de un motor de velocidad constante y de un dispositivo mecánico que permita cambiar la velocidad de forma continua también puede ser designado como variador de velocidad.

Las características de funcionamiento de los motores DC de excitación independiente y el desarrollo de la electrónica de potencia, han permitido fabricar equipos variadores de velocidad que controlan prácticamente todos los parámetros importantes del motor, permitiendo su uso en todo tipo de aplicaciones industriales. Dichas aplicaciones van desde el control de velocidad del motor hasta el control de su posición (servo-variadores).

Los motores DC pueden proporcionar altos pares de arranque, su margen de velocidad es grande por encima y por debajo de los valores nominales y su procedimiento de regulación es más sencillo y económico que los correspondientes a los motores de inducción.

Por estas razones, se siguen usando los motores DC y por lo tanto los variadores de velocidad para dicho tipo de motor han seguido desarrollándose sobre todo en lo que respecta a su etapa de control (comunicación por computadora, panel digital de programación, auto-sintonía, etc).

4.3.2. Principios de funcionamiento

Un variador es un dispositivo electrónico que posee dos funciones principales.

La primera es utilizar la corriente continua de la batería para hacer girar al motor. El variador abastece sucesivamente las 3 fases del motor teniendo en cuenta la velocidad de rotación pedida por la palanca de aceleración.

Su segunda función es abastecer el receptor y los servos con una corriente continua estabilizada (5 a 6v).

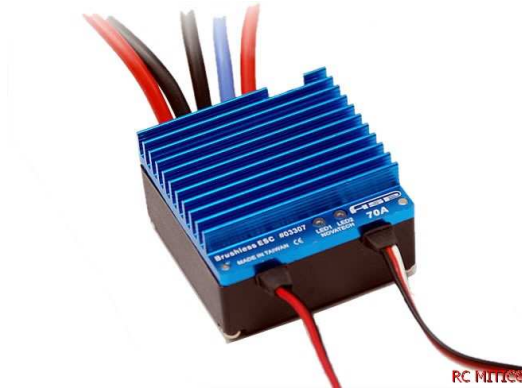


Figura 4.11.- Variador Novatech High Speed 75 A

El variador proporciona, a partir de una red de corriente alterna monofásica o trifásica, una corriente continua con control del valor medio de la tensión.

La utilización de este tipo de variadores de velocidad se adapta bien a todas las aplicaciones. Los únicos límites vienen impuestos por el propio motor de corriente continua.

4.3.3. Definición y estructura

Los variadores de velocidad electrónicos se componen de dos módulos:

- Un módulo de control que controla el funcionamiento del aparato.
- Un módulo de potencia que alimenta el motor con energía eléctrica.

4.3.3.1. El módulo de control

En los variadores modernos, todas las funciones se controlan mediante un microprocesador que gestiona la configuración, las órdenes transmitidas por un operador o por una unidad de proceso y los datos proporcionados por las medidas como la velocidad.

4.3.3.2. El módulo de potencia

El módulo de potencia está principalmente constituido por:

- Componentes de potencia (diodos, tiristores, IGBT...).

- Interfaces de medida de las tensiones y/o corrientes.
- Frecuentemente de un sistema de ventilación.

4.3.3.3. Componentes de Potencia

Los componentes de potencia son semiconductores que funcionan en «todo o nada», comparables a los interruptores que pueden tomar dos estados: abierto o cerrado.

Estos componentes, integrados en un módulo de potencia, constituyen un convertidor que alimenta, a partir de la red a tensión y frecuencia fijas, un motor eléctrico con una tensión y/o frecuencia variables.

Los componentes de potencia son la clave de la variación de velocidad y los progresos realizados estos últimos años han permitido la fabricación de variadores de velocidad económicos.

4.3.4. Principales modos de funcionamiento

Los variadores de velocidad pueden, según el convertidor electrónico, o hacer funcionar un motor en un solo sentido de rotación, y se llaman «unidireccionales», o en los dos sentidos de la marcha, y se llaman entonces «bidireccionales».

4.3.5. Características técnicas

Las características técnicas del variador empleado son las siguientes [15]:

- Variador Novatech High Speed HSP Brushless Eléctrico 75A ESC.
- Detección automática de las células de la batería.
- Protección contra el sobrecalentamiento. Actúa cuando la temperatura es superior a: 98°C (+/-3-5° C)
- Modo Failsafe (modo de apagado en caso de interferencias o pérdida de cobertura).
- Dispone de marcha adelante, freno y marcha atrás.
- Auto apagado.
- Auto configuración neutral.

- Indicadores LEDS de estado.

Voltaje de entrada	7,2V - 12V
Potencia máx. de salida	540W/60 seg.
BEC	5V, 1ª
Peso	90 gr.
Dimensiones	45 mm x 50 mm x 27 mm

Tabla 4.4.- Características técnicas variador Novatech

4.4. Puente H

Un Puente H o Puente en H es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico DC girar en ambos sentidos, avance y retroceso. Son ampliamente usados en robótica y como convertidores de potencia. Los puentes H están disponibles como circuitos integrados, pero también pueden construirse a partir de componentes discretos [16].

El término "puente H" proviene de la típica representación gráfica del circuito. Un puente H se construye con 4 interruptores (mecánicos o mediante transistores).

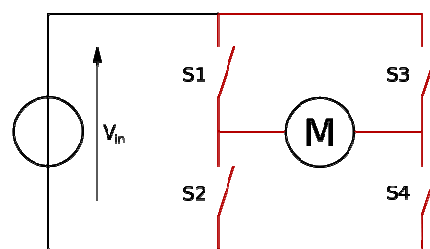


Figura 4.12.- Puente H

Cuando los interruptores S1 y S4 están cerrados y S2 y S3 abiertos, se aplica una tensión positiva en el motor, haciéndolo girar en un sentido. Abriendo los interruptores S1 y S4 y cerrando S2 y S3, el voltaje se invierte, permitiendo el giro en sentido inverso del motor.

Con la nomenclatura que estamos usando, los interruptores S1 y S2 nunca podrán estar cerrados al mismo tiempo, porque esto cortocircuitaría la fuente de tensión. Lo mismo sucede con S3 y S4.

Así, vamos a analizar los cuatro casos posibles, con los pares S1S4/S2S3:

S1	S2	S3	S4	RESULTADO
1	0	0	1	El motor gira en <i>avance</i>
0	1	1	0	El motor gira en <i>retroceso</i>
0	0	0	0	El motor se detiene bajo su inercia
0	1	0	1	El motor frena (<i>fast-stop</i>)

Tabla 4.5.- Casos puente H

Se diferencian dos casos extremos:

- Si el motor no se alimenta y tiene una velocidad dada por algún valor anterior, esté solo frenará por rozamiento y la inercia del robot.
- Si utilizamos el último caso, le ordenamos al motor girar en los dos sentidos a la vez. Como consecuencia de esto, el motor se para de forma inmediata y eficaz, pero parece claro que consumirá mucha más corriente, existiendo la posibilidad de quemar el circuito o el propio motor en casos extremos. Además, dado el aumento de consumo, reducirá notablemente la duración de las baterías.

4.4.1. L298N

L298N es un puente H doble de alta potencia con las siguientes características [17]:

- Corriente de operación hasta 2A por cada puente H
- Fuente de alimentación hasta 46V
- Fuente de alimentación para la parte lógica hasta 7V
- Velocidad de conmutación de hasta 40KHz
- 15 pines

Puede trabajar con dos fuentes de alimentación diferentes, de ese modo la lógica puede trabajar con un voltaje más bajo (TTL estándar). Se pueden poner en paralelo los puentes H para aumentar la capacidad de corriente de operación.

Es ideal para controlar motores de mediana potencia en proyectos de robótica.

Este integrado contiene dos puentes H y por tanto con él se puede manejar hasta dos motores, en nuestro caso solo utilizaremos uno. El motor, gracias a este integrado, podrá ser alimentado a una tensión distinta de los 5V que emite el PIC, por lo que se resuelven los problemas propuestos.

En el proyecto es utilizado como convertidor de potencia para proteger el microcontrolador frente posibles picos de corriente que pudieran dañarlo, ya que el L298N aguanta hasta 2 A como se ha descrito previamente.

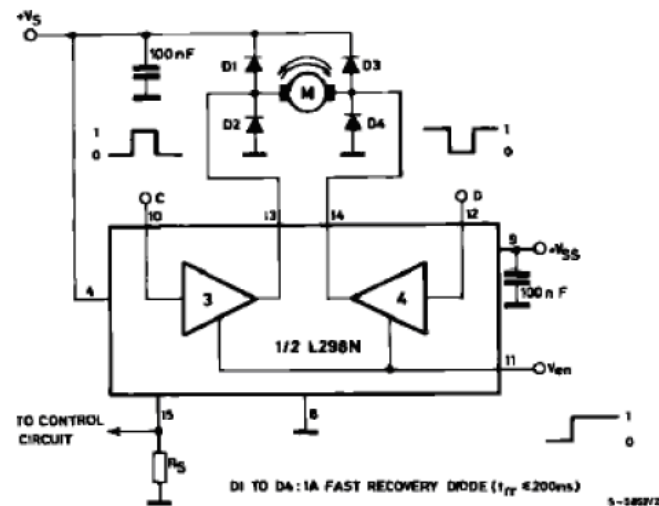


Figura 4.13.- L298N

Inputs		Function
$V_{en} = H$	$C = H ; D = L$	Forward
	$C = L ; D = H$	Reverse
	$C = D$	Fast Motor Stop
$V_{en} = L$	$C = X ; D = X$	Free Running Motor Stop

L = Low

H = High

X = Don't care

Tabla 4.6.- Casos L298N

El L298 soporta hasta 2 Amperios de corriente, con lo que se debe tener mucho cuidado al elegir los motores, porque puede que consuman más de estos 2 Amperios y no valga este integrado.

Esquema del L298 donde se ven sus pines y los puentes en H:

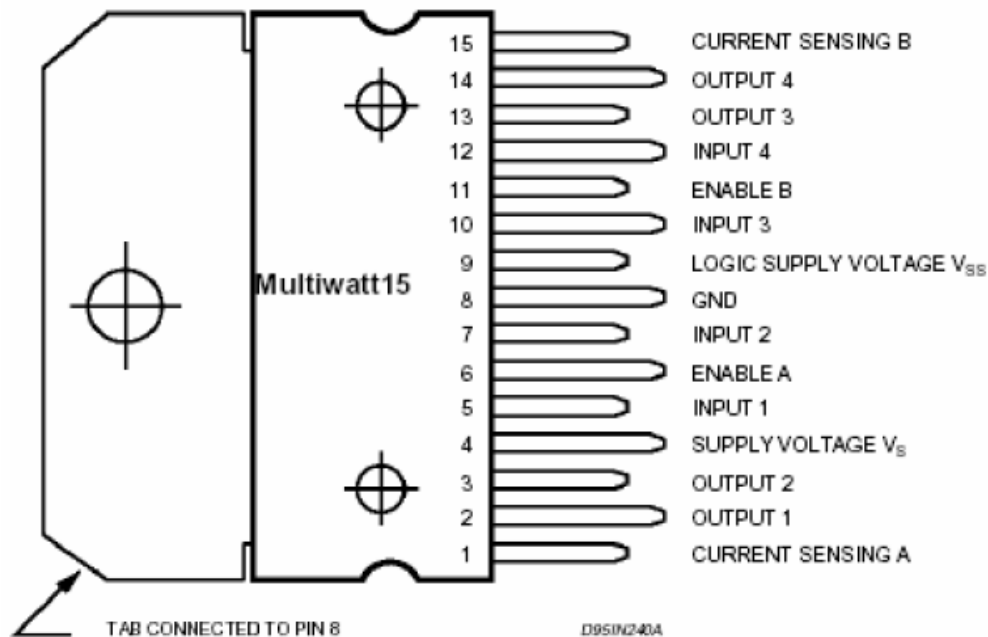


Figura 4.14.- Patillaje del L298N

4.4.2. Componentes del puente H

Además del L298N, se han utilizado otros componentes para la construcción del puente H utilizado en el proyecto. Un puente rectificador de diodos monofásico W02G, cuya hoja de características se puede ver en los anexos, y dos condensadores de 100 nF cada uno.

En la *figura 4.1.5* se puede ver el esquema del circuito empleado con todos sus componentes y conexiones. Las señales V_s y V_{ss} corresponden con las tensiones recibidas tanto por el variador como por el microcontrolador respectivamente, ambas de 5 V. La señal PWM 1 hace referencia a la modulación por anchura de pulsos enviada hacia el motor brushless y PWM 2 a la recibida por el microcontrolador.

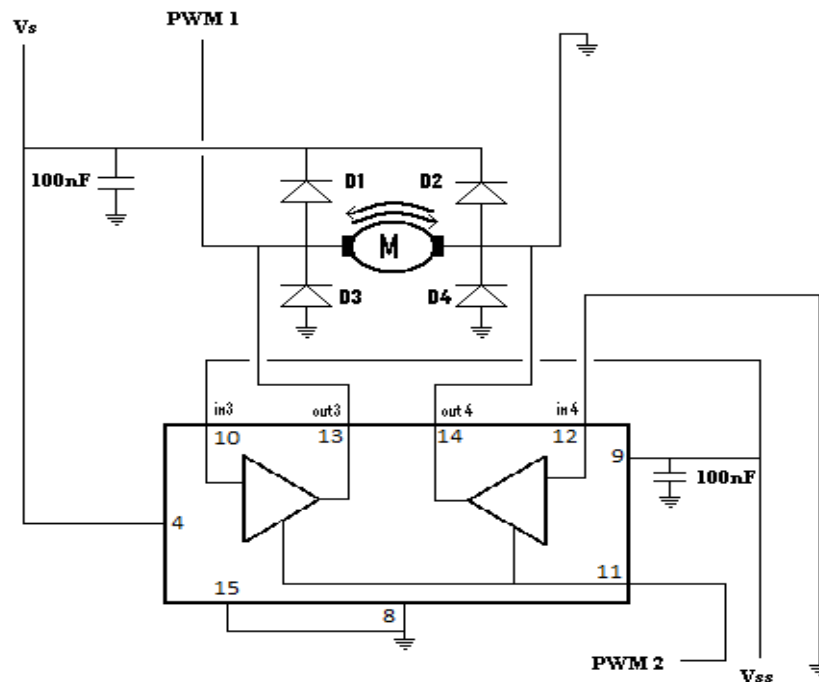


Figura 4.15.- Puente H utilizado en el proyecto

4.5. Giróscopo

4.5.1. Definición

El giroscopio o giróscopo es un dispositivo mecánico formado esencialmente por un cuerpo con simetría de rotación que gira alrededor de su eje de simetría [18]. Cuando se somete el giroscopio a un momento de fuerza que tiende a cambiar la orientación del eje de rotación su comportamiento es aparentemente paradójico ya que el eje de rotación, en lugar de cambiar de dirección como lo haría un cuerpo que no girase, cambia de orientación en una dirección perpendicular a la dirección "intuitiva".

4.5.2. Historia

El giroscopio fue inventado en 1852 por León Foucault, quien también le dio el nombre, montando una masa rotatoria en un soporte de Cardano para un experimento de demostración de la rotación de la tierra. La rotación ya había sido demostrada con el péndulo de Foucault. Sin embargo no comprendía el por qué la velocidad de rotación del péndulo era más lenta que la velocidad de rotación de la tierra por un factor $\sin(\lambda)$, donde λ representa la latitud en que se localiza el péndulo. Se necesitaba otro aparato para demostrar la rotación de la tierra de forma más simple. Foucault presentó así un

aparato capaz de conservar una rotación suficientemente rápida (150 a 200 vueltas por minuto) durante un tiempo suficiente (una decena de minutos) para que se pudiesen hacer medidas. Esta proeza mecánica (para la época) ilustra el talento de Foucault y su colaborador Froment en mecánica.

Foucault también se dio cuenta de que su aparato podía servir para indicar el Norte. En efecto, si se impiden ciertos movimientos del soporte del giroscopio, este se alinea con el meridiano. Esto permitió la invención del girocompás.

Los giroscopios se han utilizado en girocompases y giropilotos. Los giroscopios también se han utilizado para disminuir el balanceo de navíos, para estabilizar plataformas de tiro y para estabilizar plataformas inerciales sobre las cuales están fijados captadores de aceleración para la navegación inercial en aviones y misiles construidos antes de la aparición del GPS. El efecto giroscópico es la base del funcionamiento de los juguetes trompo o peonza y dynabee.

4.5.3. El efecto giroscópico

4.5.3.1. Descripción del efecto

Supongamos un giroscopio formado por un disco montado sobre un eje horizontal, alrededor del cual el disco gira libremente a gran velocidad, como se observa en la *figura 4.16*. Un observador mantiene el eje del fondo con la mano izquierda y el eje de delante con la mano derecha. Si el observador trata de hacer girar el eje hacia la derecha (bajando la mano derecha y subiendo la mano izquierda) sentirá un comportamiento muy curioso, ya que el giroscopio empuja su mano derecha y tira de su mano izquierda. El observador acaba de sentir el efecto giroscopio. Es una sensación muy sorprendente porque da la impresión de que el giroscopio no se comporta como un objeto "normal".

En la *figura 4.16* se observa como cuando se empuja el lado derecho hacia abajo, este, en lugar de bajar, se mueve hacia el observador.

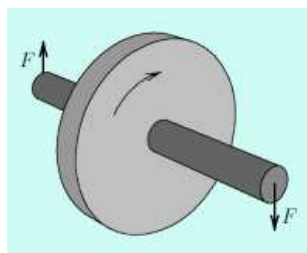


Figura 4.16.- Sentido de las fuerzas

4.5.3.2. Explicación del efecto

Sea el objeto dibujado en la *figura 4.17*, formado por dos masas (en negro) de pequeñas dimensiones sujetas por una barra (en verde) en forma de T de masa despreciable y total rigidez. El centro de la T está fijado a un soporte por medio de una rótula que permite que la barra en T gire libremente alrededor de cualquier eje.

Las masas giran rápidamente alrededor del punto fijo con una velocidad tangencial V_T . En el momento cuando las masas pasan por la posición del dibujo se da un golpecito hacia abajo en la extremidad libre de la T. Ese golpecito es en realidad una fuerza aplicada durante un corto instante y se llama, en Física, un impulso. La barra verde transmite ese impulso a las dos masas y le da a cada una, una pequeña velocidad horizontal ΔV perpendicular a la velocidad actual. Hacia la derecha en la masa de arriba y hacia la izquierda en la masa de abajo.

En la *figura 4.17* aparecen las dos masas vistas desde arriba. Las velocidades comunicadas por la impulsión se suman a las velocidades corrientes. El resultado es que la velocidad de la masa de arriba se desvía ligeramente hacia la derecha y la velocidad de la masa de abajo se desvía hacia la izquierda. Y el resultado final es que el plano de rotación de las dos masas ha girado un poco hacia la derecha. O, dicho de otra manera, el eje de rotación de las dos masas ha girado hacia la derecha.

En un giroscopio no se trata de dos masas puntuales sino de masas distribuidas sobre todo el disco o el cilindro, pero eso no cambia el fondo de la explicación. Y cuando, en lugar de darle un impulso a un giroscopio, se le aplica un momento, se puede considerar este momento como una sucesión de cortos impulsos. Cada una de ellos añade a las masas una ínfima velocidad perpendicular a sus velocidades. Eso hace que la velocidad cambie de dirección sin cambiar de módulo.

En la *Figura 4.17* se puede ver cuando se da un golpecito en la extremidad de la barra horizontal se comunica a las masas una velocidad horizontal perpendicular a sus velocidades tangenciales.

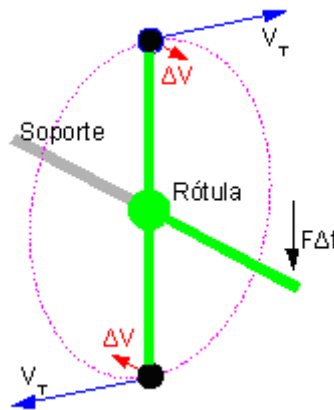


Figura 4.17.- Vectores de velocidad

En la *Figura 4.18* se ve la vista desde arriba. Las velocidades de la masa de arriba están dibujadas en trazos continuos y las de la masa de abajo en punteado.

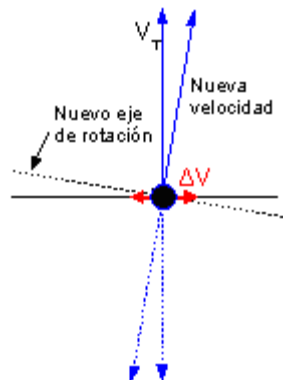


Figura 4.18.- Velocidades de masa

4.5.4. Movimientos del giroscopo

De acuerdo con la mecánica del sólido rígido, además de la rotación alrededor de su eje de simetría, un giroscopo presenta en general dos movimientos principales: la precesión y la nutación. Este hecho se deduce directamente de las ecuaciones de Euler.

4.5.4.1. Precesión

Cuando se aplica un momento \mathbf{M} a un cuerpo en rotación cuyo momento angular es \mathbf{L} , la dirección del eje de rotación del cuerpo se anima de un movimiento de rotación de velocidad angular $\mathbf{\Omega}$. Esta velocidad angular, llamada velocidad de precesión, está relacionada con el momento y el momento angular por la fórmula:

$$\mathbf{M} = \mathbf{\Omega} \times \mathbf{L}$$

La velocidad de precesión, como todas las velocidades angulares se miden en radianes/segundo. En módulo, la velocidad de precesión es igual a $\Omega = \frac{M}{L}$. Es decir, para una misma cantidad de momento, la magnitud de la velocidad de precesión es tanto más pequeña cuanto el momento angular sea más grande. Y como el momento angular es el producto de la velocidad de rotación del giroscopio multiplicada por su momento de inercia, se puede reducir la velocidad de precesión aumentando el momento de inercia, la velocidad de rotación o ambas.

Aquí encontramos el interés de utilizar un giroscopio para conservar una referencia de dirección. Partiendo del reposo, todos los cuerpos conservan la orientación que tienen salvo cuando se les aplican momentos externos. En ese caso, cuando un cuerpo no gira, el efecto del momento es el de crear una aceleración angular, la cual crea una velocidad angular creciente. Cuando el momento se interrumpe, el objeto sigue girando con la velocidad angular que adquirió. En cambio, cuando el mismo momento se aplica a un objeto en rotación, este comienza a girar con la velocidad de precesión calculada antes. Y cuando el momento se interrumpe, la precesión del objeto también se interrumpe. El resultado es que, en un giroscopio, los momentos parásitos tienen mucho menos efecto a largo plazo que en un objeto sin rotación. Además, se puede disminuir el efecto de esos momentos, aumentando el momento de inercia y la velocidad de rotación del giroscopio.

4.5.4.2. Nutación

Cuando el momento que causa la precesión cambia de valor, la velocidad de precesión también cambia de valor. Pero ese cambio no sucede instantáneamente. Hay un periodo de transición durante el cual el giroscopio "cede" un poquito al momento en la misma dirección que un objeto que no gira.

Después el giroscopio recobra lo que había cedido, oscilando en la dirección del momento alrededor de la trayectoria de precesión final.

Este movimiento de oscilación transitorio se llama nutación.

Si el cambio de valor de los momentos se prolonga, la nutación puede durar mucho. Es el caso de la tierra. La atracción de la luna y del sol sobre el hinchamiento de la tierra en el ecuador es diferente entre el lado próximo y el lado lejano respecto al astro. Esa diferencia de atracción crea un momento, el cual causa la precesión de los equinoccios. Pero, como ni el sol ni la luna están en el plano del ecuador terrestre, el momento producido por estos astros cambia periódicamente y el movimiento de nutación de la tierra no se amortigua.

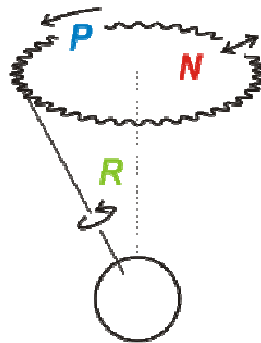


Figura 4.19.- Movimiento de precesión, nutación y rotación

4.5.5. Efecto en una bicicleta

Se ha supuesto durante mucho tiempo sobre que el efecto giroscópico estaba relacionado con el equilibrio de las bicicletas y motocicletas, aunque ha sido varias veces refutado. La forma más sencilla de comprobar que el efecto giroscópico no aporta estabilidad a una bicicleta es compensarlo con giróscopos en las ruedas. El experimento ha sido realizado y se ha comprobado que la bicicleta es perfectamente estable sin efecto giroscópico neto. Sin embargo, es imposible conducir una bicicleta con el manillar bloqueado, lo que demuestra que son las fuerzas centrífugas (en el sistema de referencia de la bicicleta) que aparecen al mover el manillar las que le confieren estabilidad. Una bicicleta o una motocicleta lanzadas en movimiento sin conductor, siguen avanzando sin caerse hasta que encuentren un obstáculo o que pierdan su impulso. La trayectoria será una espiral, un círculo o, raramente, una recta.

En el dibujo está representada una bicicleta en movimiento con el manillar derecho e inclinada un poco hacia la izquierda. El peso de la bicicleta crea un momento τ que tiende a inclinar aún más la bicicleta y a hacerla caer. Pero como la bicicleta avanza, la rueda de delante tiene un momento angular \vec{L} dirigido hacia la izquierda. La rueda de atrás también tiene un momento angular, pero la manera en la cual está sujeta no le permite tener efecto en el equilibrio de la bicicleta. Este momento crea una variación $\Delta\vec{L}$, dirigida hacia atrás, del momento angular de la rueda de delante. Esto quiere decir que la rueda de delante gira hacia la izquierda, como si se hubiese girado el manubrio hacia la izquierda. La bicicleta comienza a voltear hacia la izquierda. Mientras el momento haga inclinarse más la bicicleta, el momento angular de la rueda de delante se inclinará hacia atrás, el manubrio hacia la izquierda y el radio de la trayectoria de la bicicleta disminuirá.

Visto desde el sistema acelerado y no inercial de la bicicleta, el radio de rotación disminuye lo cual aumenta la fuerza centrífuga. Esta fuerza centrífuga crea un momento que tiende a enderezar la bicicleta y a compensar el momento del peso que tiende a hacerla caer. Cuando los dos momentos terminan por compensarse, la bicicleta deja de inclinarse y el manubrio de girar hacia la izquierda. La bicicleta continúa en su trayectoria circular con radio constante. Si el frotamiento con el aire u otras cosas disminuyen la velocidad de la bicicleta, la fuerza centrífuga disminuirá, la bicicleta recomenzará a caerse lo cual hará girar el manubrio hacia la izquierda. El radio de giro disminuirá, lo cual aumentará la fuerza centrífuga hasta que ésta compense de nuevo el momento del peso. Cuando el manubrio llega a 90° o se bloquea, la bicicleta se cae.

Si se lanza una bicicleta con el manubrio inmovilizado (amarrado), la bicicleta se caerá como si estuviese parada.

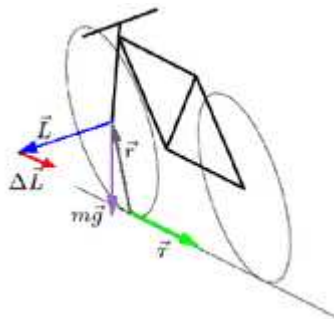


Figura 4.20.- Momentos en una bicicleta

Cuando la bicicleta se inclina hacia la izquierda, el momento creado por el peso sobre la rueda delantera desplaza el momento angular de esta hacia atrás y la hace virar hacia la izquierda. Esta situación continúa hasta que el momento creado por la fuerza centrífuga debida al giro compense el momento creado por el peso.

4.5.6. Estructura y funcionamiento del giróscopo eléctrico

En el presente proyecto, el giróscopo desempeña un papel muy importante ya que es el encargado de proporcionar a la moto una estabilidad adicional para poder trabajar con ella a velocidades medias y bajas.

El giróscopo eléctrico utilizado está dividido en dos partes bien diferenciadas:

- La primera de ellas está compuesta por un motor de corriente continua y un regulador, que serán los encargados de recibir la tensión de la batería, regular dicha tensión de entrada y mediante el motor conectado al eje central de la rueda hacer que el giróscopo gire a grandes velocidades, manteniendo su máxima velocidad durante su uso.



Figura 4.21.- Motor y regulador del giróscopo

- La segunda parte, formada por un disco de 11 cm de diámetro y un grosor de 1.5 cm, será la encargada de girar a grandes velocidades una vez haya sido ensamblada con el motor y el regulador.



Figura 4.22.- Giróscopo eléctrico

El giróscopo se encuentra situado en el interior de la rueda trasera de la moto y se alimenta por medio de dos cables que irán conectados a la horquilla trasera. A través de sus brazos circulará la tensión que alimentará al pequeño motor de continua mediante el eje de la rueda, haciendo que éste entre en funcionamiento poniendo así en marcha el giróscopo y su funcionamiento a altas rpm. El giróscopo alcanza su máxima velocidad al cabo de 40 segundos y su velocidad no depende del giro de la rueda trasera, ya que al llevar un motor funciona de manera independiente.



Figura 4.23.- Horquilla trasera con giróscopo

4.6. Baterías

La primera de ellas es una batería de níquel-metal (NiMh) de 7,2 V y 3.300 mAh mediante la cual se alimenta todo el sistema electrónico anteriormente descrito [19].

Algunas características eléctricas de las baterías de NiMH son:

- Baja resistencia de salida, lo que implica que suministren alta corriente al descargarse.
- Buen rendimiento: prácticamente, toda la energía suministrada hasta plena carga se recupera en la descarga.
- Es común su fallo dando tensión nula, pero no circuito abierto, por lo que en caso de este fallo el paquete de baterías seguirá alimentando su carga, pero con un elemento menos (no nos deja totalmente tirados).
- Tienen alta demanda en coches o motos eléctricas, que adicionalmente alimentan receptor, ESC y servo de dirección. Por reglamento, el paquete de baterías es de hasta 6 elementos de hasta 3600 mAh (NiMH).



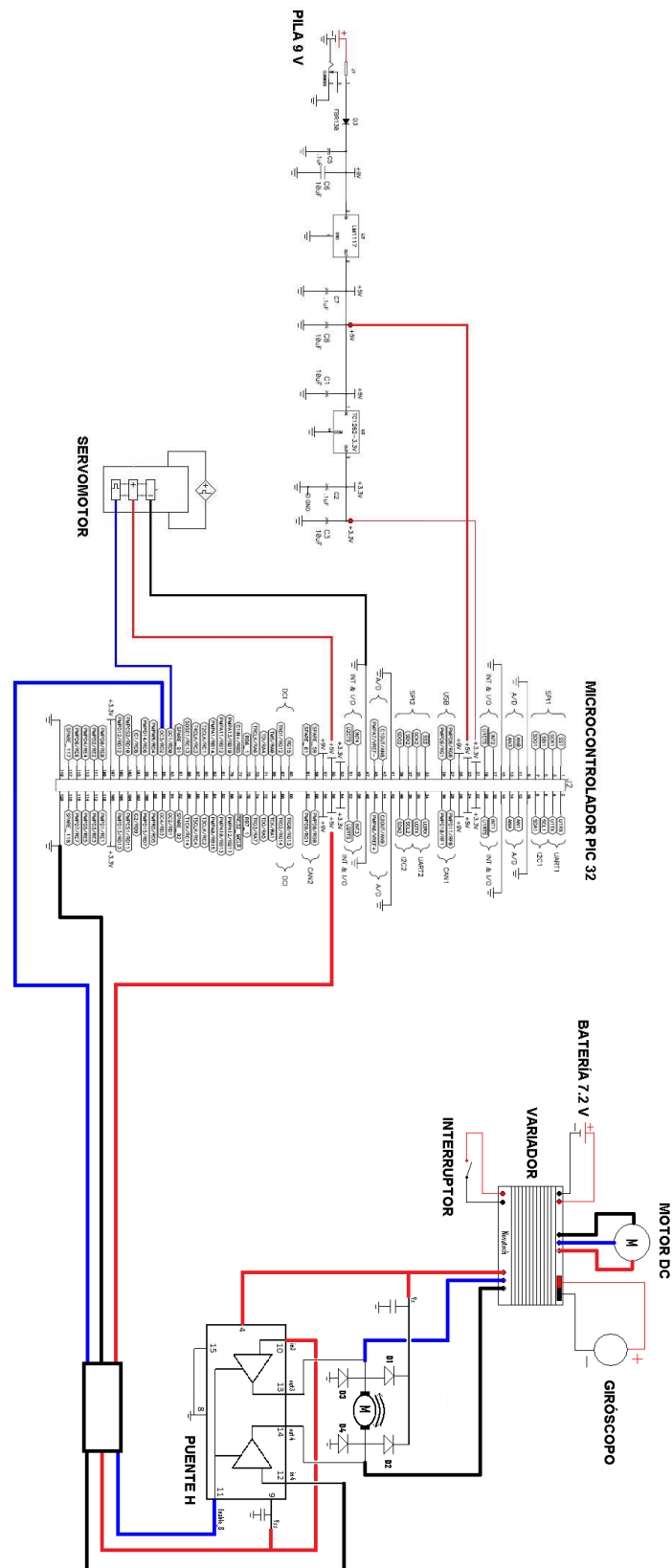
Figura 4.24.- Batería NiMh 7.2 V

La segunda de ellas es una pila de 9 V con un conector mediante la cual se alimenta el microcontrolador.



Figura 4.25.- Pila de 9 V con conector

4.7. Conexión sistema electrónico



4.8. Esquema general

A continuación se muestra un esquema general de la moto ya montada, donde se numera cada una de sus partes electrónicas para poder ubicarlas y diferenciarlas dentro de la misma.

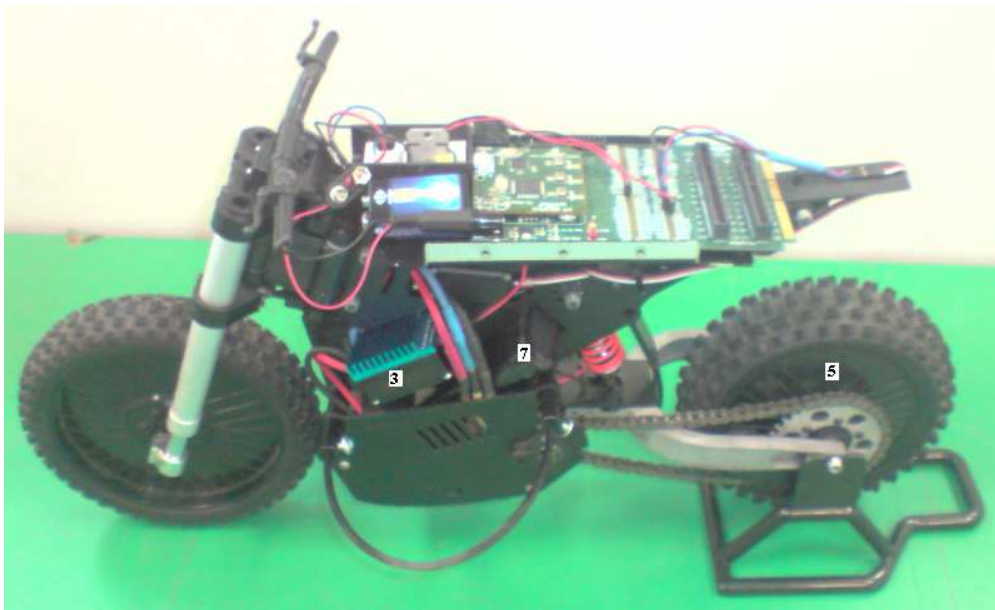


Figura 4.26.- Lateral izquierdo de la moto

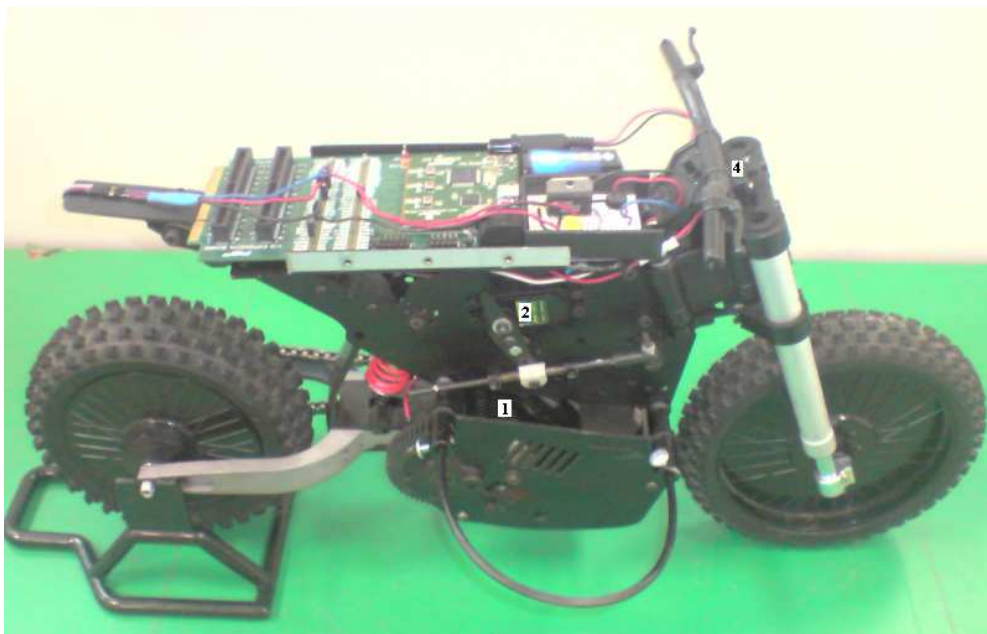


Figura 4.27.- Lateral derecho de la moto

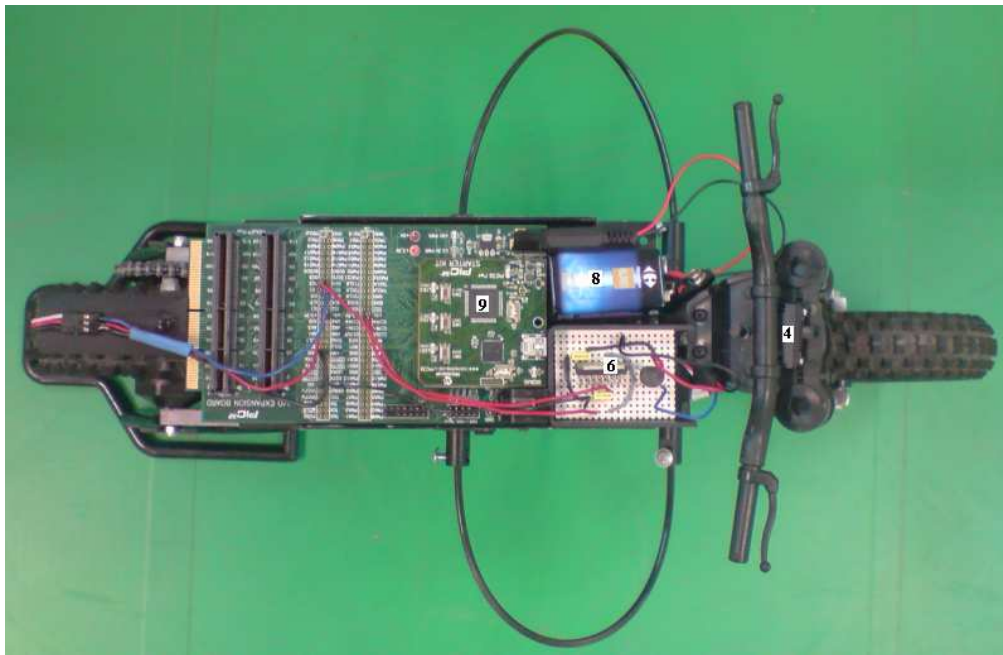


Figura 4.28.- Planta de la moto

Donde:

- 1.- Motor brushless
- 2.- Servomotor
- 3.- Variador
- 4.- Interruptor variador
- 5.- Giróscopo
- 6.- Puente H
- 7.- Batería 7.2 V
- 8.- Pila 9 V con conector
- 9.- Microcontrolador



Capítulo 5.

Control mediante PWM

5.1. Introducción

5.1.1. Definición

La modulación por anchura de pulsos (ó PWM, del inglés pulse-width modulation) es una técnica de modulación en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica para, entre otras cosas, variar la velocidad de un motor [20].

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación al período. Cuanto más tiempo pase la señal en estado alto, mayor será la velocidad del motor.

Este tren de pulsos, en realidad, hace que el motor marche alimentado por la tensión máxima de la señal durante el tiempo en que esta se encuentra en estado alto, y que pare en los tiempos en que la señal está en estado bajo.

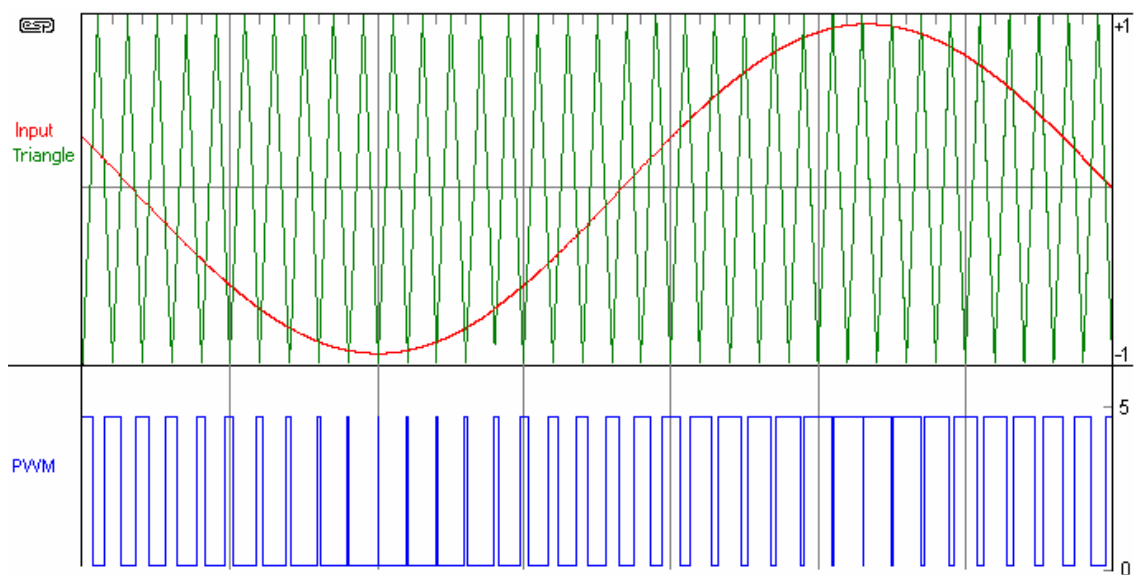


Figura 5.1.- Modulación por ancho de pulsos

5.1.2. Aplicaciones

El abanico de aplicaciones en las que se puede utilizar esta técnica es muy amplio, incluyendo el control de fuentes conmutadas, controles de motores, controles de elementos termoelectrónicos, choppers para sensores en ambientes ruidosos y algunas otras aplicaciones, tales como el manejo de servos de modelismo. En la actualidad existen muchos circuitos integrados que integran la función PWM, tales como los microcontroladores PIC. Se distinguen por fabricar este tipo de integrados

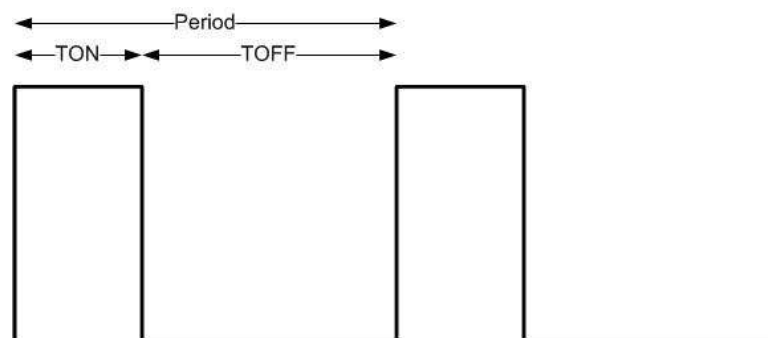
compañías como Texas Instruments, National Semiconductor, Maxim, y algunas otras más.

En relación a los motores, podemos decir que la modulación por ancho de pulsos es una técnica utilizada para regular la velocidad de giro de los motores eléctricos. Mantiene el par motor constante y no supone un desaprovechamiento de la energía eléctrica. Se utiliza, como su nombre lo indica, al controlar mediante algún circuito de potencia el momento alto (encendido o alimentado) y el momento bajo (apagado o desconectado) del motor.

Otros sistemas para regular la velocidad modifican la tensión eléctrica, con lo que disminuye el par motor; o interponen una resistencia eléctrica, con lo que se pierde energía en forma de calor en esta resistencia.

5.1.3. Duty cycle

Recibe este nombre la relación de tiempos entre el estado alto y bajo de la señal utilizada. Se expresa como un porcentaje entre el periodo y el ancho del pulso. Cuando el Duty Cycle es cercano al 100%, el motor girará a una velocidad cercana a la máxima, ya que la tensión promedio aplicada en sus bornes será casi igual a V. Si el Duty Cycle se aproxima a 0%, el motor girará muy despacio, ya que la tensión promedio será casi cero.



$$\text{Period} = \text{TON} + \text{TOFF}$$

$$\text{Frequency} = 1 / \text{Period}$$

$$\text{Duty Cycle} = \frac{\text{TON}}{\text{TON} + \text{TOFF}} * 100$$

Figura 5.2.- Esquema PWM

5.2. Servomotor

La modulación por anchura de pulso, PWM (Pulse Width Modulation), es una de los sistemas más empleados para el control de servos. Este sistema consiste en generar una onda cuadrada en la que se varía el tiempo que el pulso está a nivel alto, manteniendo el mismo período (normalmente), con el objetivo de modificar la posición del servo según se desee [21].

Para la generación de una onda PWM en un microcontrolador, lo más habitual es usar un timer y un comparador (interrupciones asociadas), de modo que el microcontrolador quede libre para realizar otras tareas, y la generación de la señal sea automática y más efectiva. El mecanismo consiste en programar el timer con el ancho del pulso (el período de la señal) y al comparador con el valor de duración del pulso a nivel alto. Cuando se produce una interrupción de overflow del timer, la subrutina de interrupción debe poner la señal PWM a nivel alto y cuando se produzca la interrupción del comparador, ésta debe poner la señal PWM a nivel bajo.

El sistema de control de un servo se limita a indicar en que posición se debe situar. Esto se lleva a cabo mediante una serie de pulsos tal que la duración del pulso indica el ángulo de giro del motor. Cada servo tiene sus márgenes de operación, que se corresponden con el ancho del pulso máximo y mínimo que el servo entiende. Los valores más generales se corresponden con pulsos de entre 1 ms y 2 ms de anchura, que dejarían al motor en ambos extremos (0° y 180°). El valor 1.5 ms indicaría la posición central o neutra (90°), mientras que otros valores del pulso lo dejan en posiciones intermedias. Estos valores suelen ser los recomendados, sin embargo, es posible emplear pulsos menores de 1 ms o mayores de 2 ms, pudiéndose conseguir ángulos mayores de 180° . Si se sobrepasan los límites de movimiento del servo, éste comenzará a emitir un zumbido, indicando que se debe cambiar la longitud del pulso. El factor limitante es el tope del potenciómetro y los límites mecánicos constructivos.

El período entre pulso y pulso (tiempo de OFF) no es crítico, e incluso puede ser distinto entre uno y otro pulso. Se suelen emplear valores ~ 20 ms (entre 10 ms y 30 ms). Si el intervalo entre pulso y pulso es inferior al mínimo, puede interferir con la temporización interna del servo, causando un zumbido, y la vibración del eje de salida. Si es mayor que el máximo, entonces el servo pasará a estado dormido entre pulsos. Esto provoca que se mueva con intervalos pequeños.

Es importante destacar que para que un servo se mantenga en la misma posición durante un cierto tiempo, es necesario enviarle continuamente el pulso correspondiente. De este modo, si existe alguna fuerza que le obligue a abandonar esta posición, intentará resistirse. Si se deja de enviar pulsos (o el intervalo entre pulsos es mayor que el máximo) entonces el servo perderá fuerza y dejará de intentar mantener su posición, de modo que cualquier fuerza externa podría desplazarlo.

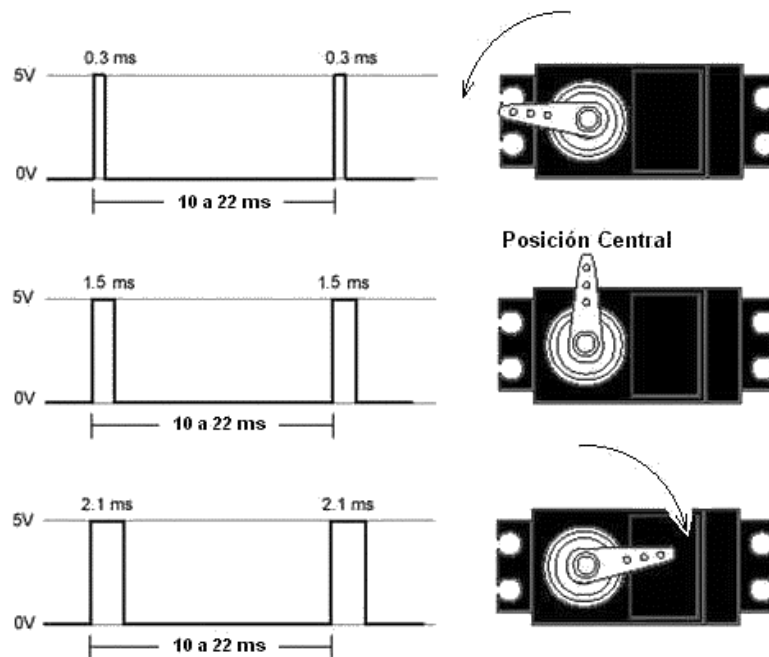


Figura 5.3.- Posición del servo en función de la PWM

5.3. Motor DC

Por medio de la técnica de modulación de ancho de pulso se puede realizar un control para sistemas que están a larga distancia ya que se puede evitar la interferencia proveniente del exterior permitiendo realizar un control de la forma más óptima [22].

La ventaja de utilizar el ancho de pulso como control de una variable, es que no se ve afectada por ruido eléctrico, inyectado a lo largo de la línea de transmisión, sin importar si la amplitud del pulso se ve reducida por el ruido externo o por la misma resistencia de la línea de transmisión; ya que el circuito no está observando la amplitud de la señal si no la frecuencia que ésta posee además del ancho de pulso Ton o Toff.

El circuito que recibe la señal modulada permite transformar la serie de pulsos en una señal análoga, el cual es llamado circuito demodulador de ancho de pulso. Para un mejor control el Ton mínimo o Toff mínimo debe ser al menos el 10% del periodo y el Ton máximo 90%. La aplicación del PWM se realiza por medio del PIC32, el cual posee un módulo interno de PWM, donde se puede extraer una gran gama de pulsos los cuales van a tener una precisión bastante grande.

La parte de potencia donde se piensa controlar el motor es un puente en H, el cual va a ser diseñado para soportar la máxima corriente de arranque que el motor tiene en ese instante. Para el aislamiento entre la parte de potencia y la parte electrónica de control, se usan diodos, que evitan posibles daños en la parte de control. Para realizar la inversión de giro, se intercambian los terminales que alimentan al motor, por lo tanto se usan SCRs, los cuales cumplen la función de interruptores controlados, los cuales se conmutan dependiendo del sentido de giro.

El modelo del puente en H utilizado es basado en el funcionamiento del motor DC con la ayuda del microcontrolador PIC32, se conecta en la entrada el control mediante PWM y al otro lado del puente se conecta a tierra para obtener un sentido de giro del motor, si se desea que el motor gire en sentido contrario se deben intercambiar estos 2 terminales.

Un controlador para un motor comercial es un circuito que altera la velocidad del motor, para el cual se tiene el manual del usuario del controlador que explica la mayoría de las características que son incorporadas en los controladores modernos y por qué su necesidad.

Para controlar la velocidad de un motor DC se necesita un voltaje variable DC de la fuente de alimentación. Sin embargo si se usa un motor de 12 Voltios y se conecta la alimentación, el motor empezará a aumentar su velocidad; los motores no responden inmediatamente, necesitan un pequeño intervalo de tiempo para alcanzar su velocidad máxima. Si se apaga la alimentación en algún momento antes que el motor alcance su máxima velocidad, se notará una disminución de ésta y si se enciende la alimentación y se apaga rápidamente, el motor tomará una velocidad comprendida entre velocidad cero y velocidad máxima. Esto es exactamente lo que hace un controlador PWM: alimentar el motor suministrándole una serie de pulsos. Para controlar la velocidad del motor se varía (modula) el ancho de los pulsos, y como el motor siempre se encuentra alimentado a su tensión nominal nunca se verá reducido su torque nominal.

En la *figura 5.4* se puede observar en la parte A la velocidad máxima que se controla con PWM, aproximadamente el 90% del tiempo encendido. En la parte B el 50% y en la parte C la velocidad mínima o el 10% del tiempo encendido.

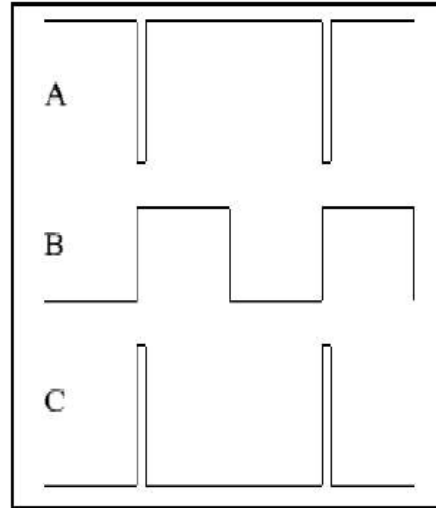


Figura 5.4.- Velocidad máxima, media y mínima



Capítulo 6. *Conclusiones y* *trabajos futuros*

6.1. Conclusiones

El proyecto realizado tenía como principal objetivo el desarrollo de una moto de automodelismo capaz de ser controlada por computador, manteniéndose estable a velocidades medias-bajas. Para ello se instaló un microcontrolador PIC 32 el cual será el encargado de controlar tanto la velocidad de giro del motor brushless como la posición del servomotor. Este control se realizará de manera autónoma mediante la descarga de datos de un computador al microcontrolador mediante una conexión USB.

Una vez finalizado el proyecto se puede concluir que se han alcanzado los siguientes objetivos:

- Construcción de una moto de automodelismo por piezas realizando la inserción y conexión de los motores con su respectiva puesta a punto.
- Dotación de la electrónica y mecánica necesarias para proporcionarle estabilidad a velocidades de trabajo medias y bajas.
- Sustitución de la parte de radiocontrol por un microcontrolador encargado de controlar la moto de manera autónoma.
- Programación del microcontrolador siendo capaz de gobernar los motores mediante la técnica PWM.

Los problemas y dificultades surgidas durante la realización del proyecto fueron las siguientes:

- Se dieron unas pautas para la realización del proyecto y se tuvo que realizar una investigación previa de cómo solventar los problemas planteados, ya que no se tenía ningún tipo de conocimiento acerca de este tema.
- Al no tener un control en tiempo real sobre la moto hará que sea imposible evitar cualquier imprevisto que pueda surgir durante la ruta programada.
- Es necesario lanzar de manera manual con un pequeño impulso la moto ya que al ser un robot móvil de dos ruedas carece de estabilidad inicial.

- Se necesita de un espacio abierto lo suficientemente extenso y sin ningún obstáculo intermedio para poder realizar las pruebas de campo pertinentes.

6.2. Trabajos futuros

Como desarrollos futuros pueden incluirse las siguientes líneas de estudio:

- Desarrollar un sistema que permita el control del microcontrolador sobre el funcionamiento y la velocidad de giro del giróscopo situado en la rueda trasera para variar la estabilidad de la moto según su necesidad.
- Instalar un encoder en la rueda delantera para registrar la velocidad de la moto en el microcontrolador en función del número de vueltas que dé la rueda por segundo.
- Colocar sensores infrarrojos en los laterales de la moto para medir y registrar en el microcontrolador la distancia al suelo e inclinación de la misma, para mediante una programación adecuada, conseguir que el servo cambie su posición durante el trayecto para lograr recuperar la estabilidad de la moto.
- Dotar al sistema con sensores de presencia en el chasis para evitar el choque contra obstáculos.



Capítulo 7. *Costes del proyecto*

En este capítulo se presentan de forma aproximada los costes del proyecto que han sido necesarios. Para ello se desglosan las tareas que se realizaron ordenándolas temporalmente.

En la Tabla 7.1 se observan los costes de tiempo para cada fase del proyecto, mientras que en la Tabla 7.2 se detallan los costes de material como de tiempo en términos monetarios.

FASES	TIEMPO (h)
Estudio y comprensión del problema a resolver	60
Montaje del sistema mecánico	25
Montaje del sistema electrónico	20
Iniciación a MPLAB	15
Programación del código a implementar	25
Pruebas a pie de campo	50
Mejoras para optimizar el código (ajuste de parámetros, ajustes iniciales, etc.)	10
	SUBTOTAL 1 = 205 h
Memoria del proyecto (realización paralela al mismo)	150
	SUBTOTAL 2 = 150 h
	<u>TOTAL = 355 h</u>

Tabla 7.1.- Tiempo invertido en cada fase del proyecto



Suponiendo un precio horario aproximado de 25 €/hora, el coste total sería:

CONCEPTO	COSTE
Coste asociado a las horas ingeniero	25 €/h x 355 h = 8875 €
Moto automodelismo ARX-540	430 €
Giróscopo eléctrico	100 €
Microcontrolador PIC 32	55 €
Expansion Board PIC 32	68 €
Software MPLAB	0 €
Circuito puente H	10 €
Carcasa	15 €
	<u>TOTAL = 9553 €</u>

Tabla 7.2.- Costes económicos del proyecto



Bibliografía



MANUALES

- [1] Manual de montaje ARX-540
- [2] Catálogo 2010 AR Racing

PROYECTOS FIN DE CARRERA

- [3] Mini-moto controlada por computador: arquitectura software. *Núñez Yáñez, Pablo.*
- [4] Sistema de control de un vehículo de inspección remota mediante marcación por tonos. *Sánchez Donaire, Sergio.*
- [5] Diseño de un robot móvil para la realización de tareas de transporte de cargas en un hospital. *Fidalgo Rodríguez, Damián.*
- [6] Micro-robot móvil autónomo rastreador con control remoto basado en un enlace radio. *Rísquez López, Óliver.*

PÁGINAS WEB

- [7] Introducción a la robótica:
< <http://fundamentosinformaticosjl.wordpress.com/2008/01/27/las-computadoras/> >
- [8] Clasificación de los robots:
< <http://www.monografias.com/trabajos6/larobo/larobo.shtml> >
- [9] Robots móviles: < <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/784/78460301.pdf> >
- [10] Historia de las motos RC: < <http://autodelismo.com/> >
- [11] Introducción motores brushless:
< http://es.wikipedia.org/wiki/Motor_el%C3%A9ctrico_sin_escobillas >
- [12] Principio funcionamiento motor brushless:
< <http://www.brushlessmotor.com.ar/Caracteristicas.html> >
- [13] Características técnicas motor brushless:
< http://www.kdmodel.com/b36_en.htm >



[14] Servomotor:

< <http://www.taringa.net/posts/ebooks-tutoriales/3702891/Trabajar-con-Servos.html>

[15] Características técnicas variador Novatech:

<<http://www.rcmitico.es/emisorasy cristales/novatechhighspeedhspbrushlesselectric75aesc.php> >

[16] Puente H: < [http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_H_\(electr%C3%B3nica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_H_(electr%C3%B3nica)) >

[17] L298N: < <http://www.bricogeek.com/shop/182-driver-alta-potencia-l298n.html> >

[18] Giróscopo: < <http://es.wikipedia.org/wiki/Gir%C3%B3scopo> >

[19] Baterías: < <http://platea.pntic.mec.es/~lmarti2/baterias.htm> >

[20] Modulación PWM: < <http://www.ucontrol.com.ar/wiki/index.php?title=PWM> >

[21] Modulación PWM en un servomotor:

< http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/sistema/motores_servo.htm >

[22] Modulación PWM en un motor brushless:

< <http://www.buenastareas.com/ensayos/Control-Velocidad-Motor-Cc-Con-Pwm/644993.html> >



Anexos

ANEXO I.- L298N



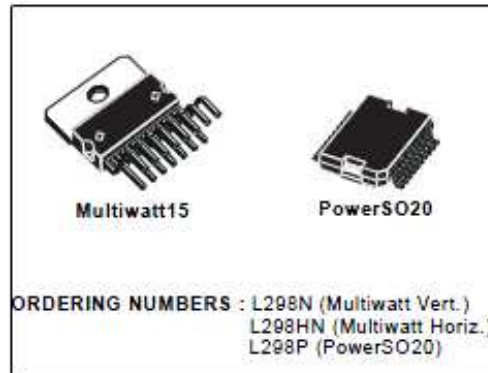
L298

DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

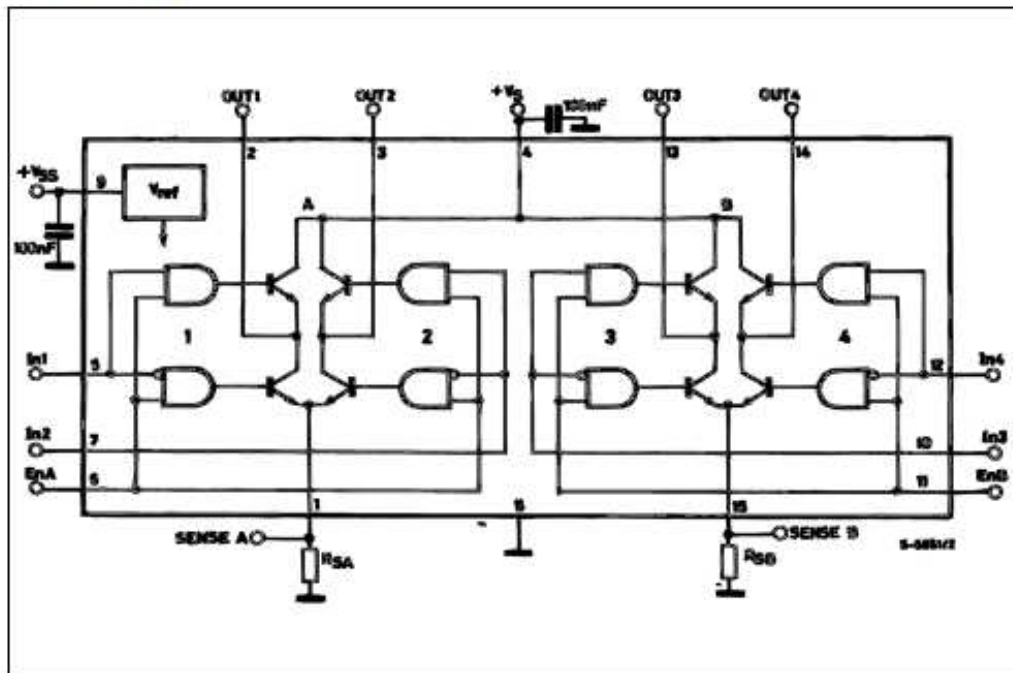
DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the connection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.



section of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

BLOCK DIAGRAM



January 2000

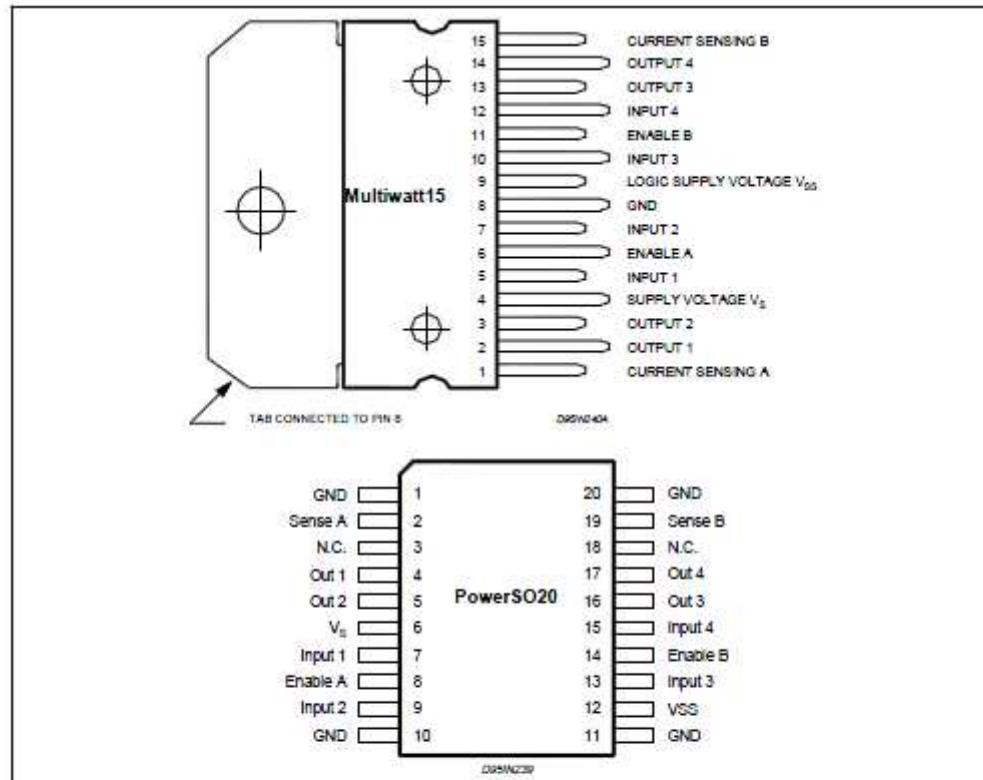
1/13

L298

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_S	Power Supply	50	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V_{in}, V_{en}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I_O	Peak Output Current (each Channel)		
	- Non Repetitive ($t = 100\mu s$)	3	A
	- Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$)	2.5	A
	- DC Operation	2	A
V_{sens}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P_{tot}	Total Power Dissipation ($T_{case} = 75^\circ C$)	25	W
T_{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
T_{stg}, T_J	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

PIN CONNECTIONS (top view)



THERMAL DATA

Symbol	Parameter	PowerSO20	Multiwatt15	Unit
$R_{th(j-case)}$	Thermal Resistance Junction-case	Max. -	3	$^\circ C/W$
$R_{th(j-amb)}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max. 13 (*)	35	$^\circ C/W$

(*) Mounted on aluminum substrate

L298

PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

MW.15	PowerSO	Name	Function
1;15	2;19	Sense A; Sense B	Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.
2;3	4;5	Out 1; Out 2	Outputs of the Bridge A; the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.
4	6	V _S	Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
5;7	7;9	Input 1; Input 2	TTL Compatible Inputs of the Bridge A.
6;11	8;14	Enable A; Enable B	TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).
8	1,10,11,20	GND	Ground.
9	12	V _{SS}	Supply Voltage for the Logic Blocks. A 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
10; 12	13;15	Input 3; Input 4	TTL Compatible Inputs of the Bridge B.
13; 14	16;17	Out 3; Out 4	Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.
–	3;18	N.C.	Not Connected

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V_S = 42V; V_{SS} = 5V, T_J = 25°C; unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V _S	Supply Voltage (pin 4)	Operative Condition	V _{IH} +2.5		48	V
V _{SS}	Logic Supply Voltage (pin 9)		4.5	5	7	V
I _S	Quiescent Supply Current (pin 4)	V _{en} = H; I _L = 0 V _I = L V _I = H		13 50	22 70	mA mA
I _{SS}	Quiescent Current from V _{SS} (pin 9)	V _{en} = L V _I = X V _{en} = H; I _L = 0 V _I = L V _I = H V _{en} = L V _I = X		24 7	36 12	mA mA mA
V _L	Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		–0.3		1.5	V
V _{IH}	Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		2.3		V _{SS}	V
I _L	Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V _I = L			–10	μA
I _{IH}	High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V _I = H ≤ V _{SS} –0.6V		30	100	μA
V _{en} = L	Enable Low Voltage (pins 6, 11)		–0.3		1.5	V
V _{en} = H	Enable High Voltage (pins 6, 11)		2.3		V _{SS}	V
I _{en} = L	Low Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V _{en} = L			–10	μA
I _{en} = H	High Voltage Enable Current (pins 6, 11)	V _{en} = H ≤ V _{SS} –0.6V		30	100	μA
V _{CEsat} (H)	Source Saturation Voltage	I _L = 1A I _L = 2A	0.95	1.35 2	1.7 2.7	V V
V _{CEsat} (L)	Sink Saturation Voltage	I _L = 1A (5) I _L = 2A (5)	0.85	1.2 1.7	1.6 2.3	V V
V _{CEsat}	Total Drop	I _L = 1A (5) I _L = 2A (5)	1.80		3.2 4.9	V V
V _{sens}	Sensing Voltage (pins 1, 15)		–1 (1)		2	V



L298

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$T_1 (V_i)$	Source Current Turn-off Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		1.5		μs
$T_2 (V_i)$	Source Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		0.2		μs
$T_3 (V_i)$	Source Current Turn-on Delay	$0.5 V_i$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		2		μs
$T_4 (V_i)$	Source Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		0.7		μs
$T_5 (V_i)$	Sink Current Turn-off Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.7		μs
$T_6 (V_i)$	Sink Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (3); (4)		0.25		μs
$T_7 (V_i)$	Sink Current Turn-on Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		1.6		μs
$T_8 (V_i)$	Sink Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.2		μs
$f_c (V_i)$	Commutation Frequency	$I_L = 2A$		25	40	KHz
$T_1 (V_{en})$	Source Current Turn-off Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		3		μs
$T_2 (V_{en})$	Source Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		1		μs
$T_3 (V_{en})$	Source Current Turn-on Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		0.3		μs
$T_4 (V_{en})$	Source Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		0.4		μs
$T_5 (V_{en})$	Sink Current Turn-off Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		2.2		μs
$T_6 (V_{en})$	Sink Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (3); (4)		0.35		μs
$T_7 (V_{en})$	Sink Current Turn-on Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.25		μs
$T_8 (V_{en})$	Sink Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.1		μs

1) Sensing voltage can be $-1V$ for $t \leq 50 \mu s$; in steady state $V_{sens} \min \geq -0.5V$.

2) See fig. 2.

3) See fig. 4.

4) The load must be a pure resistor.

Figure 1 : Typical Saturation Voltage vs. Output Current.

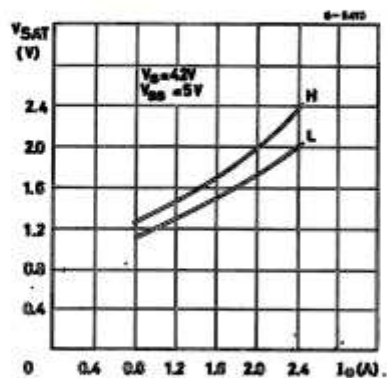
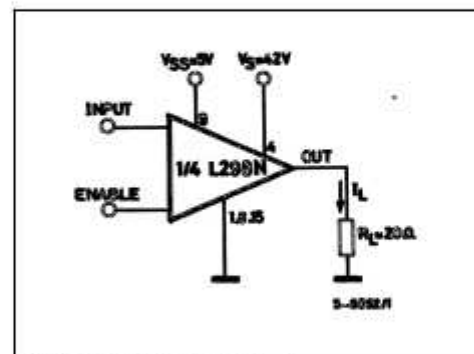


Figure 2 : Switching Times Test Circuits.



Note : For INPUT Switching, set EN = H
For ENABLE Switching, set IN = H

L298

Figure 3 : Source Current Delay Times vs. Input or Enable Switching.

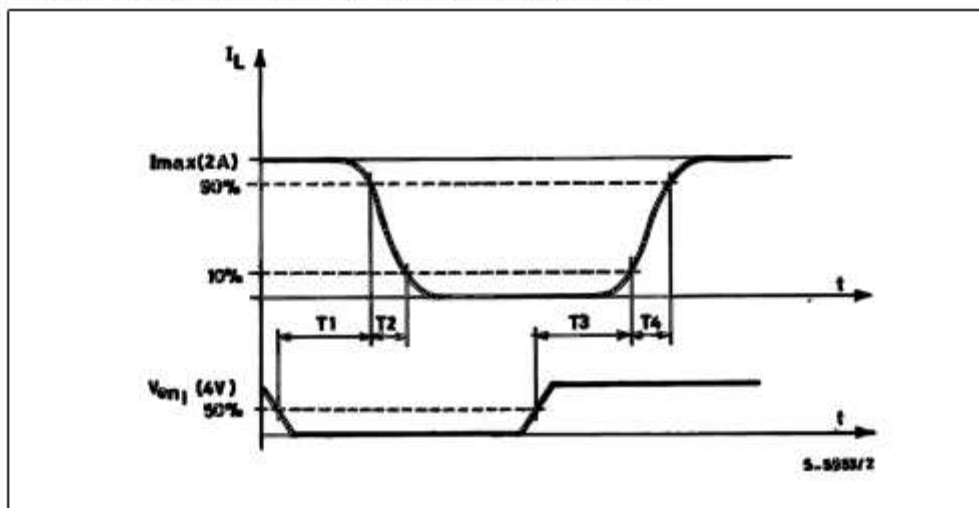
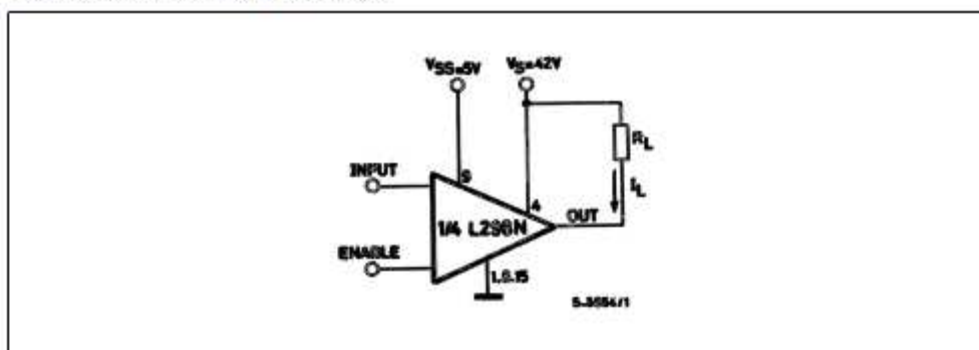


Figure 4 : Switching Times Test Circuits.



Note : For INPUT Switching, set EN = H
For ENABLE Switching, set IN = L

L298

Figure 5 : Sink Current Delay Times vs. Input 0 V Enable Switching.

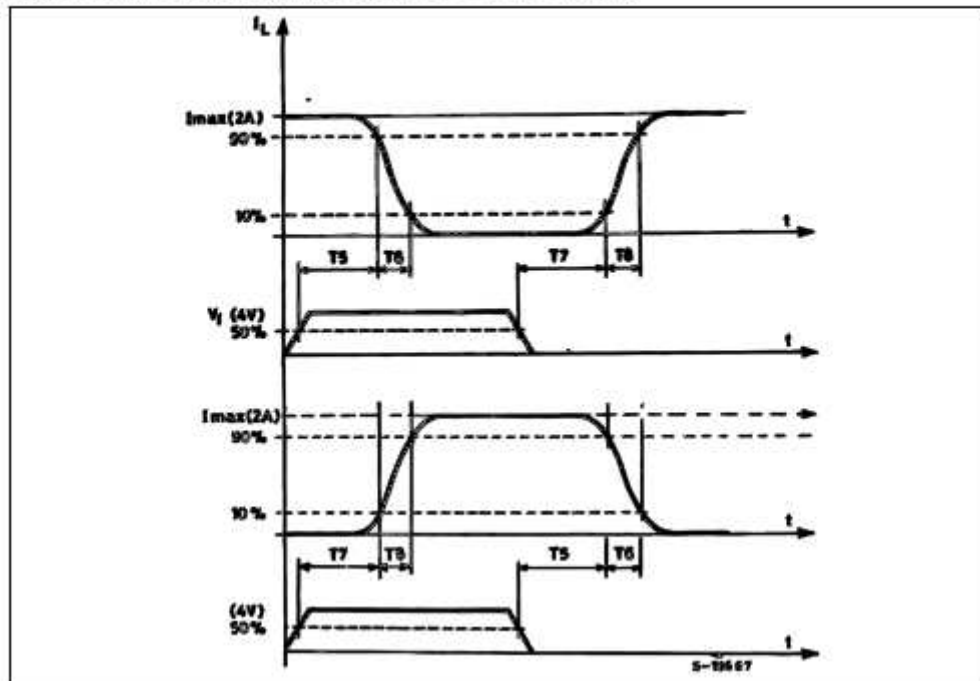
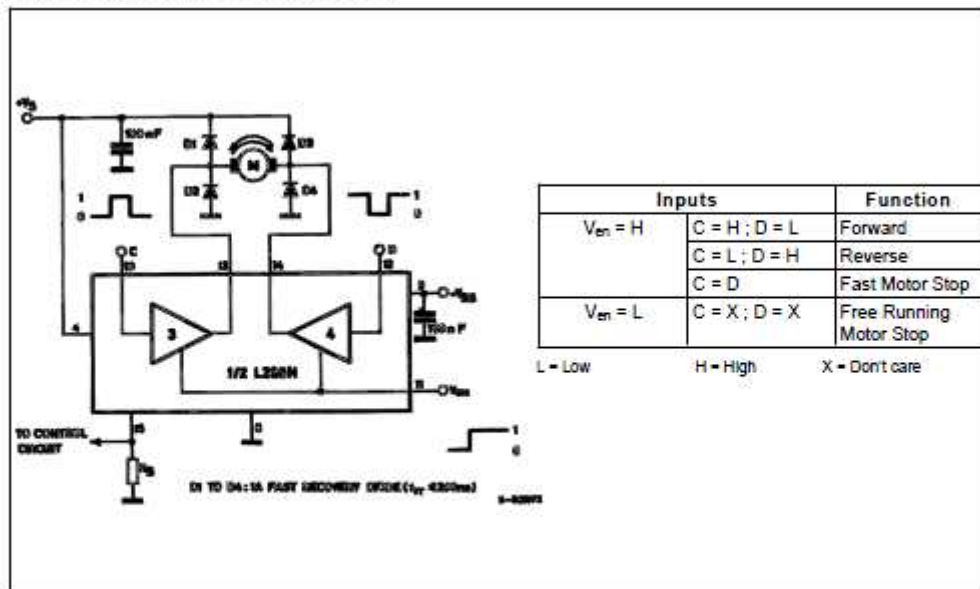
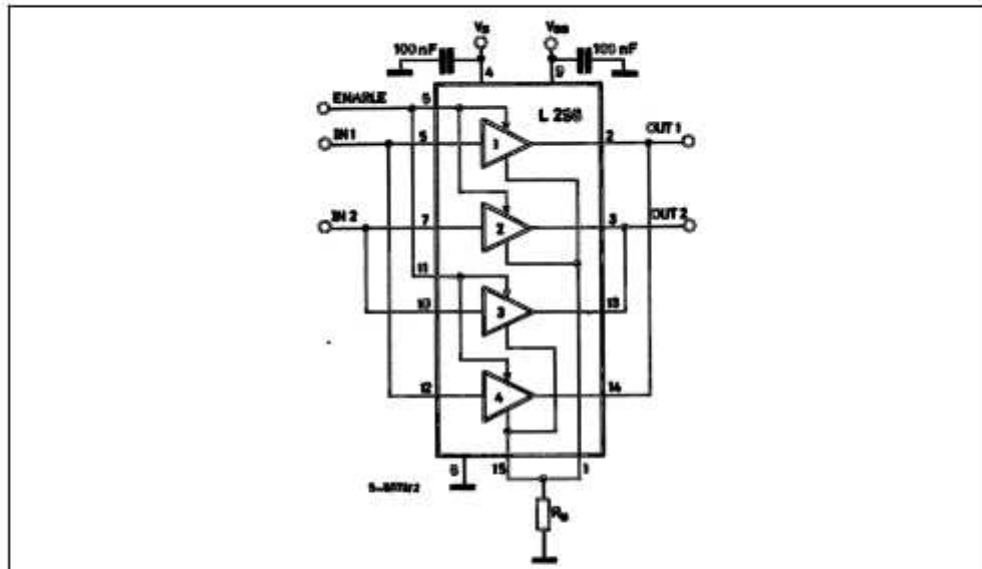


Figure 6 : Bidirectional DC Motor Control.



L298

Figure 7 : For higher currents, outputs can be paralleled. Take care to parallel channel 1 with channel 4 and channel 2 with channel 3.



APPLICATION INFORMATION (Refer to the block diagram)

1.1. POWER OUTPUT STAGE

The L298 integrates two power output stages (A; B). The power output stage is a bridge configuration and its outputs can drive an inductive load in common or differential mode, depending on the state of the inputs. The current that flows through the load comes out from the bridge at the sense output : an external resistor (R_{SA} ; R_{SB} .) allows to detect the intensity of this current.

1.2. INPUT STAGE

Each bridge is driven by means of four gates the input of which are $IN1$; $IN2$; EN_A and $IN3$; $IN4$; EN_B . The IN inputs set the bridge state when The EN input is high ; a low state of the EN input inhibits the bridge. All the inputs are TTL compatible.

2. SUGGESTIONS

A non inductive capacitor, usually of 100 nF, must be foreseen between both V_s and V_{ss} , to ground, as near as possible to GND pin. When the large capacitor of the power supply is too far from the IC, a second smaller one must be foreseen near the L298.

The sense resistor, not of a wire wound type, must be grounded near the negative pole of V_s that must be near the GND pin of the I.C.

Each input must be connected to the source of the driving signals by means of a very short path.

Turn-On and Turn-Off : Before to Turn-ON the Supply Voltage and before to Turn it OFF, the Enable input must be driven to the Low state.

3. APPLICATIONS

Fig 6 shows a bidirectional DC motor control Schematic Diagram for which only one bridge is needed. The external bridge of diodes D1 to D4 is made by four fast recovery elements ($t_{rr} \leq 200$ nsec) that must be chosen of a V_F as low as possible at the worst case of the load current.

The sense output voltage can be used to control the current amplitude by chopping the inputs, or to provide overcurrent protection by switching low the enable input.

The brake function (Fast motor stop) requires that the Absolute Maximum Rating of 2 Amps must never be overcome.

When the repetitive peak current needed from the load is higher than 2 Amps, a paralleled configuration can be chosen (See Fig.7).

An external bridge of diodes are required when inductive loads are driven and when the inputs of the IC are chopped ; Schottky diodes would be preferred.

L298

This solution can drive until 3 Amps in DC operation and until 3.5 Amps of a repetitive peak current.

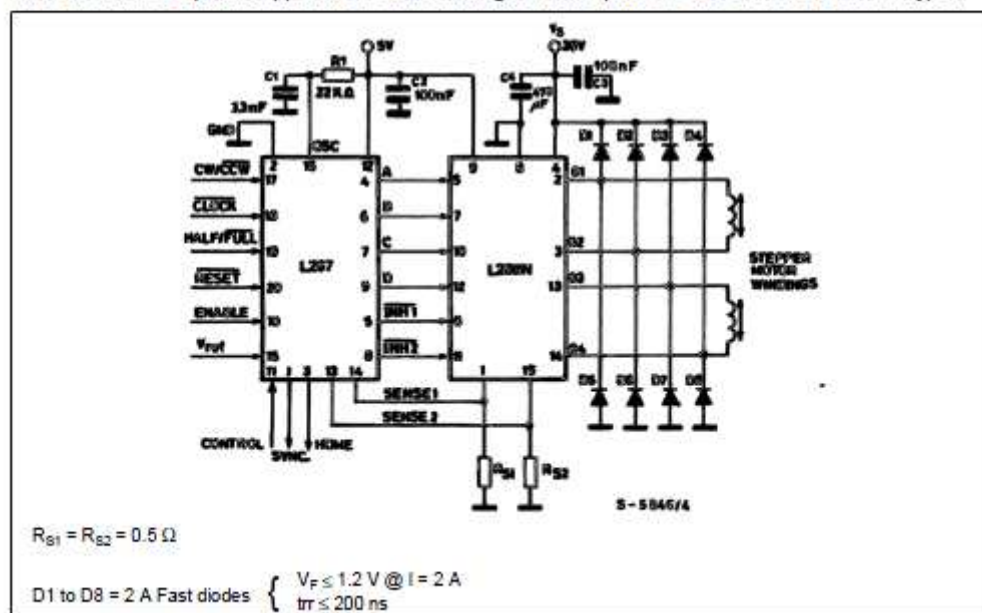
On Fig 8 it is shown the driving of a two phase bipolar stepper motor ; the needed signals to drive the inputs of the L298 are generated, in this example, from the IC L297.

Fig 9 shows an example of P.C.B. designed for the application of Fig 8.

Figure 8 : Two Phase Bipolar Stepper Motor Circuit.

This circuit drives bipolar stepper motors with winding currents up to 2 A. The diodes are fast 2 A types.

Fig 10 shows a second two phase bipolar stepper motor control circuit where the current is controlled by the I.C. L6506.



L298

Figure 9 : Suggested Printed Circuit Board Layout for the Circuit of fig. 8 (1:1 scale).

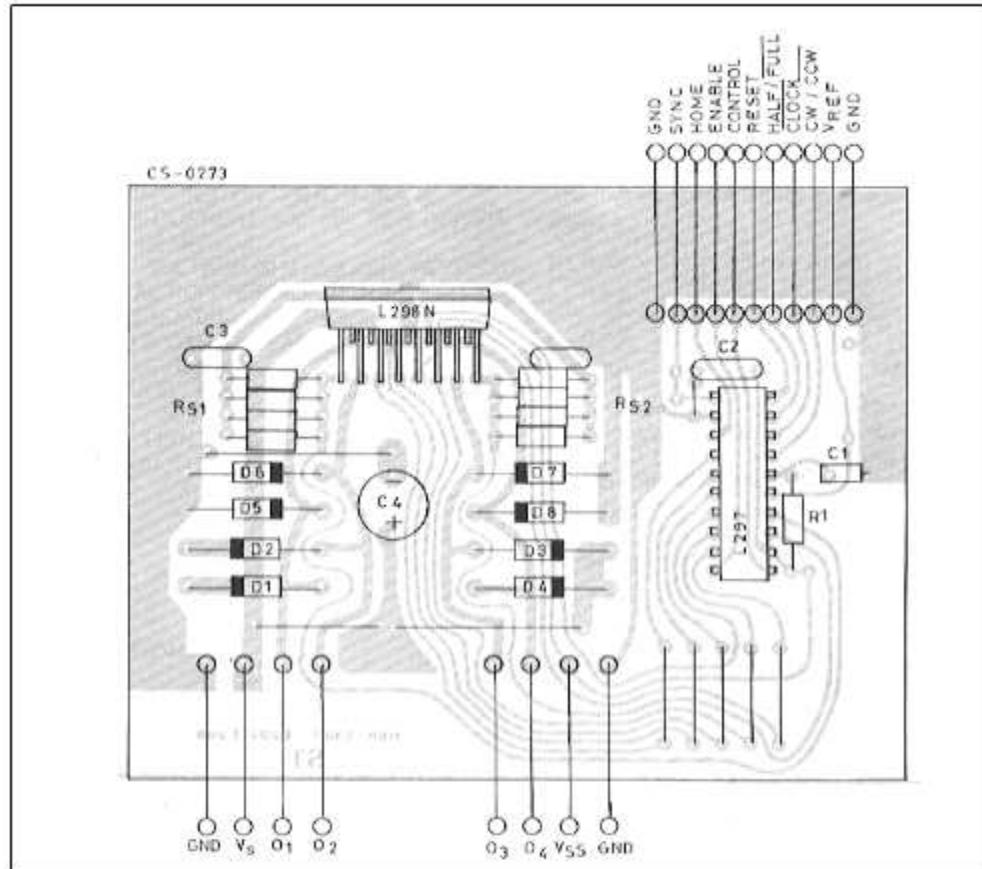
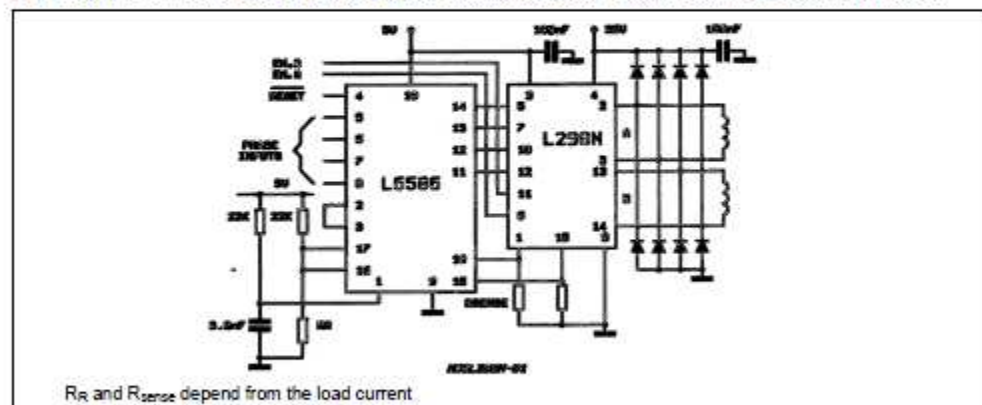


Figure 10 : Two Phase Bipolar Stepper Motor Control Circuit by Using the Current Controller L6506.



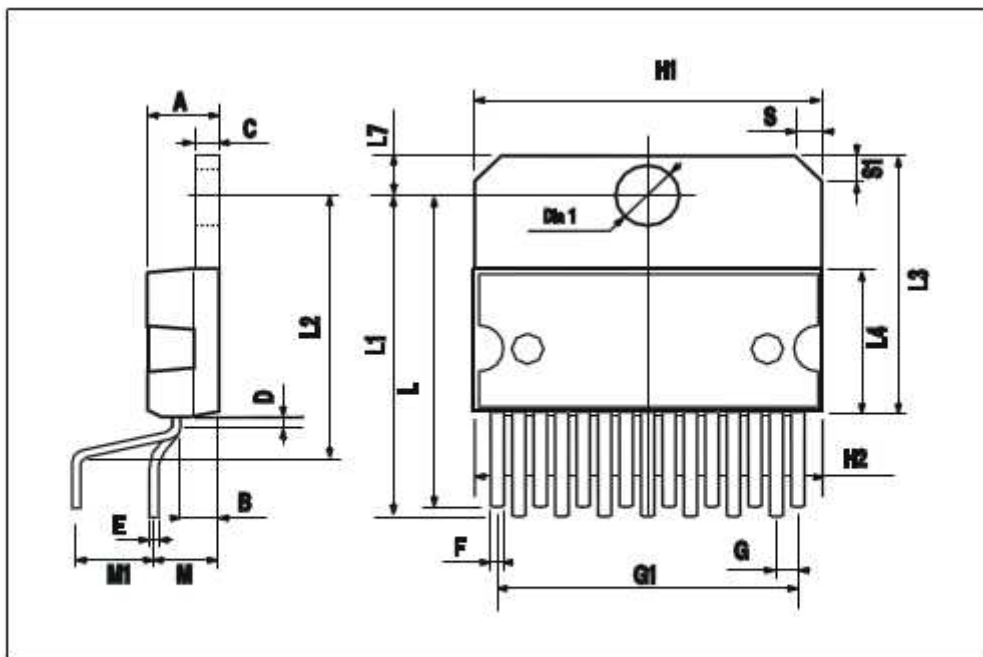
L298

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			5			0.197
B			2.65			0.104
C			1.6			0.063
D		1			0.039	
E	0.40		0.55	0.019		0.022
F	0.66		0.75	0.026		0.030
G	1.02	1.27	1.52	0.040	0.050	0.060
G1	17.53	17.78	18.03	0.690	0.700	0.710
H1	19.6			0.772		
H2			20.2			0.795
L	21.9	22.2	22.5	0.862	0.874	0.886
L1	21.7	22.1	22.5	0.854	0.870	0.886
L2	17.65		18.1	0.695		0.713
L3	17.25	17.5	17.75	0.679	0.689	0.699
L4	10.3	10.7	10.9	0.406	0.421	0.429
L7	2.65		2.9	0.104		0.114
M	4.25	4.55	4.85	0.167	0.179	0.191
M1	4.63	5.08	5.53	0.182	0.200	0.218
S	1.9		2.6	0.075		0.102
S1	1.9		2.6	0.075		0.102
Dia1	3.65		3.85	0.144		0.152

OUTLINE AND
MECHANICAL DATA



Multiwatt15 V



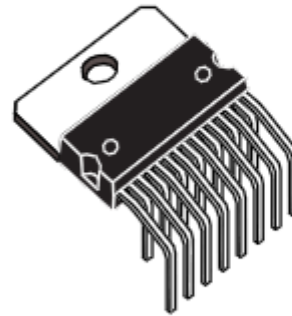
10/13



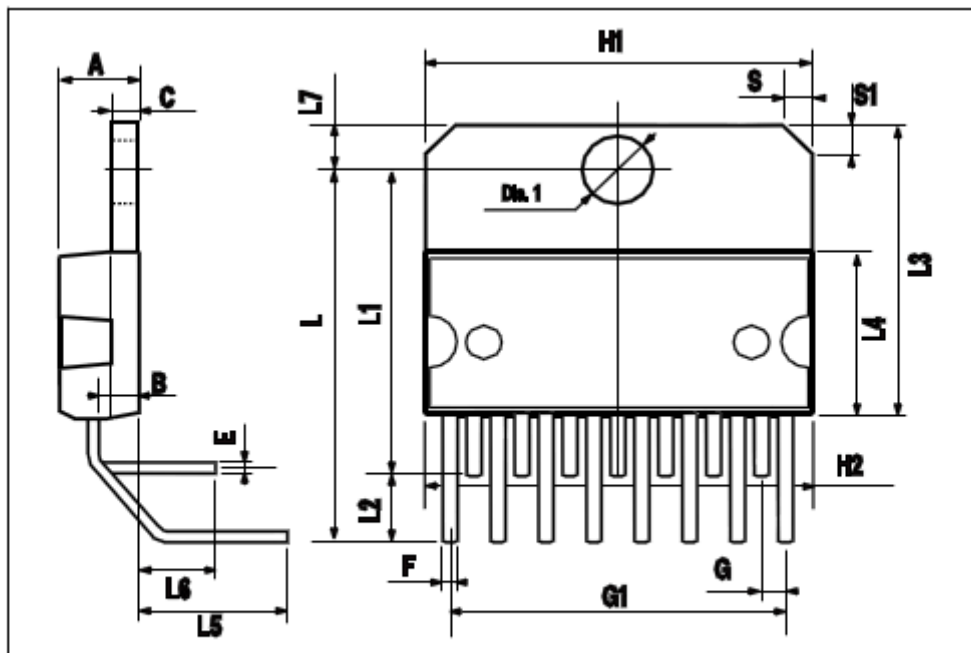
L298

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			5			0.197
B			2.65			0.104
C			1.6			0.063
E	0.49		0.55	0.019		0.022
F	0.66		0.75	0.026		0.030
G	1.14	1.27	1.4	0.045	0.050	0.055
G1	17.57	17.78	17.91	0.692	0.700	0.705
H1	19.6			0.772		
H2			20.2			0.795
L		20.57			0.810	
L1		18.03			0.710	
L2		2.54			0.100	
L3	17.25	17.5	17.75	0.679	0.689	0.699
L4	10.3	10.7	10.9	0.406	0.421	0.429
L5		5.28			0.208	
L6		2.38			0.094	
L7	2.65		2.9	0.104		0.114
S	1.9		2.6	0.075		0.102
S1	1.9		2.6	0.075		0.102
Dia1	3.65		3.85	0.144		0.152

OUTLINE AND MECHANICAL DATA



Multiwatt15 H



L298

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			3.6			0.142
a1	0.1		0.3	0.004		0.012
a2			3.3			0.130
a3	0		0.1	0.000		0.004
b	0.4		0.53	0.016		0.021
c	0.23		0.32	0.009		0.013
D (1)	15.8		16	0.622		0.630
D1	9.4		9.8	0.370		0.386
E	13.9		14.5	0.547		0.570
e		1.27			0.050	
e3		11.43			0.450	
E1 (1)	10.9		11.1	0.429		0.437
E2			2.9			0.114
E3	5.8		6.2	0.228		0.244
G	0		0.1	0.000		0.004
H	15.5		15.9	0.610		0.626
h			1.1			0.043
L	0.8		1.1	0.031		0.043
N			10° (max.)			
S			8° (max.)			
T		10			0.394	

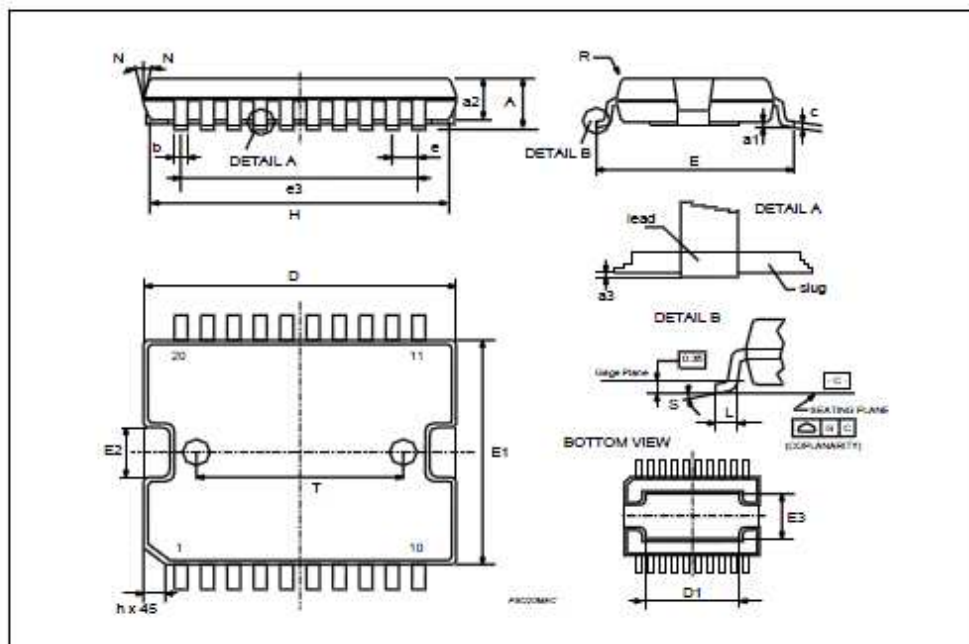
(1) "D" and "E" do not include mold flash or protrusions.
- Mold flash or protrusions shall not exceed 0.15 mm (0.006").
- Critical dimensions: "E", "G" and "a3"

OUTLINE AND MECHANICAL DATA



JEDEC MO-166

PowerSO20



12/13



ANEXO II.- W02G



DATA SHEET

W005G~W10G

1.5 AMPERE SILICON MINIATURE SINGLE-PHASE BRIDGES
VOLTAGE - 50 to 1000 Volts CURRENT - 1.5 Amperes

FEATURES

- Ratings to 1000V PRV
- Surge overload rating: 30/50 Amperes peak
- Ideal for printed circuit board
- Reliable construction utilizing molded plastic
- Mounting position: Any

MECHANICAL DATA

Case: Reliable low cost construction utilizing molded plastic technique results in inexpensive product.

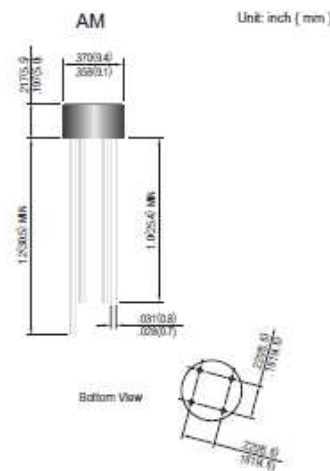
Terminals: Leads solderable per MIL-STD-202, Method 208

Polarity: Polarity symbols marking on body.

Weight: 0.05 ounce, 1.3 grams

Available with 0.50 inch leads (P/N add suffix "S")

For Capacitive load derate current by 20%.



MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Rating at 25°C ambient temperature unless otherwise specified. Resistive or inductive load, Single phase, half wave, 60Hz.
 For Capacitive load derate current by 20%.

	W005G	W01G	W02G	W04G	W06G	W08G	W10G	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS Bridge input Voltage	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC Blocking Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum Average Forward Current $T_A=50^\circ\text{C}$	1.5							A
Peak Forward Surge Current, 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load	50.0							A
I^2t Rating for fusing ($t < 8.35$ ms)	10.0							A ² S
Maximum Forward Voltage Drop per Bridge Element at 1.0A	1.0							V
Maximum Reverse Current at Rated $T_J=25^\circ\text{C}$	10.0							μA
DC Blocking Voltage per element $T_J=100^\circ\text{C}$	1.0							mA
Typical Junction capacitance per leg (Note 1) C _J	24.0							pF
Typical Thermal resistance per leg (Note 2) R _{θJA}	36.0							$^\circ\text{C/W}$
Typical Thermal resistance per leg (Note 2) R _{θJA}	13.0							$^\circ\text{C/W}$
Operating Temperature Range T_J	-55 to +125							$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range T_A	-55 to +150							$^\circ\text{C}$

NOTES:

1. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0 Volts.
2. Thermal resistance from junction to ambient and from junction to lead mounted on P.C.B. with 0.47 X 0.47" (12 X 12mm) copper pads.

DATE : 02/09/06

PAGE : 1



RATING AND CHARACTERISTIC CURVES

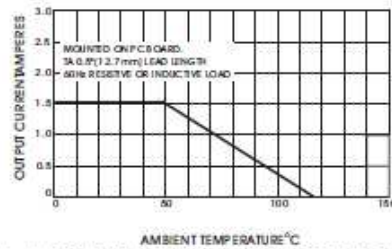


Fig. 1 - DERATING CURVE FOR OUTPUT RECTIFIED CURRENT

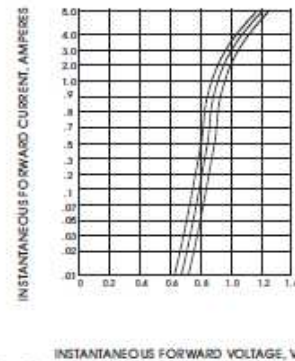


Fig. 2 - TYPICAL INSTANTANEOUS FORWARD CHARACTERISTICS (25°C)

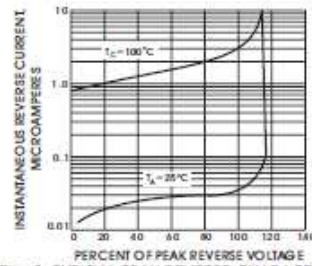


Fig. 3 - TYPICAL REAK REVERSE CHARACTERISTICS

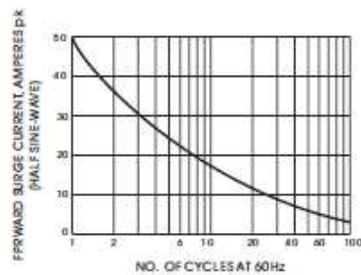


Fig. 4 - MAXIMUM NON-REPETITIVE PEAK FORWARD SURGE CURRENT